

杨晓燕, 胡永锋, 贾秋森, 等. 国际大都市碳中和行动对北京的启示 [J]. 地理科学, 2024, 44(1): 109-120. [Yang Xiaoyan, Hu Yongfeng, Jia Qiumiao et al. Inspiration from the international metropolis' zero emission action plan to the carbon neutrality of Beijing. Scientia Geographica Sinica, 2024, 44(1): 109-120.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.20220373

国际大都市碳中和行动对北京的启示

杨晓燕, 胡永锋, 贾秋森, 高晶, 祁圻

(北京市应对气候变化管理事务中心, 北京 100086)

摘要: 中国的“3060”目标对城市发展提出了更为严格的要求。为科学制定北京市碳中和目标并探索实现路径, 文中系统梳理了伦敦、纽约、东京、巴黎 4 个国际大都市的碳中和目标、实现路径及具体措施。对比分析了北京能源消费及碳排放情况与这 4 个城市的差异, 统筹考量北京目前的经济发展阶段、碳排放特点和未来城市定位等, 结合 LEAP 模型测算结果, 研究提出北京市碳中和路径。为支撑国家双碳目标, 北京实现碳中和目标应在 2055 年或 2050 年。接近远期目标结合分步骤实现, 2025 年实现碳排放达峰后稳中有降, 2035 年实现较基准年减排 35%, 2055 年/2050 年达到较基准年减排 85%。根据北京市主要碳排放源, 实现碳中和和主要集中在能源转型、建筑和交通低碳化发展、民众广泛参与以及技术创新等方向率先开展行动。

关键词: 碳中和; 国际大都市; 减排目标

中图分类号: F291 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2024)01-0109-12

在全球气候变化的影响下, 人口、资源、环境的协调发展成为社会发展面临的重要问题。在全社会普遍认识到气候变化对地球及人类产生重要影响的基础上, 《巴黎协定》^[1] 提出为达到全球 1.5°C 控温目标须在 21 世纪中叶实现碳中和的目标。碳中和是指规定时间内人为移除 CO₂ 量抵消人为排放的量^[2-3], 即人为 CO₂ 排放的源与汇达到平衡。为体现在应对气候变化问题上的责任担当, 中国宣布 CO₂ 排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和 (https://www.gov.cn/gongbao/content/2020/content_5549875.htm)。这一声明为中国绿色低碳发展提供了方向和指引, 也对各省市地方的低碳发展提出了更高要求。

中国是全球气候变化的敏感区和脆弱区, 也是极端天气气候事件发生最为频繁的国家之一^[4-6]。华北区域自 1961—2017 年平均气温以 0.33°C/10a 的速率上升^[7], 明显高于同期全国和全球平均升温幅度, 由此引发的暴雨洪涝、干旱、热浪等极端事件频

繁发生, 对该区域的城市社会发展构成了严重的威胁^[8]。北京作为该区域的超大城市, 规模宏大、结构复杂、人口众多, 是温室气体排放的重点区域^[9]。气候变化加大了城市经济与资源之间的矛盾, 绿色低碳发展成为城市的内生要求。北京市低碳发展水平在全国范围内一直处于领先地位, 2020 年国内生产总值 CO₂ 排放为 0.42 t/万元^[10], 为全国最优水平, 但与国际城市相比还存在差距。在低碳发展规划和目标上与国际大城市^[11] 相比也明显滞后, 像伦敦和纽约等与北京比肩的国际大都市均对外宣布 2050 年实现碳中和, 纽约更表态要成为第一个符合《巴黎协定》1.5°C 目标的城市, 但北京至今未明确推出与城市定位对应的碳中和目标与行动计划。

由于城市占到全球最终能源消耗的 67%~76%, 占全球化石燃料燃烧相关的 CO₂ 排放量的 71%~75%^[12], 因此城市层面是应对气候变化的关键, 城市碳中和承诺对全球应对气候变化进展作用显著。碳中和对世界来说, 是一场深刻的绿色工业革命^[13],

收稿日期: 2022-08-10; **修订日期:** 2023-01-15

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0211805)、北京市科技计划课题(Z221100005222027)资助。[Foundation: National Key Research and Development Program of China (2017YFF0211805), Beijing Science and Technology Plan Project (Z221100005222027).]

作者简介: 杨晓燕(1982—), 女, 内蒙古包头人, 副研究员, 研究方向为城市应对气候变化和环境地球化学等。E-mail: yxy8412@foxmail.com

对于城市来说,也是一场深刻的变革。鉴于城市应对气候变化的复杂性和系统性,国内学者对于城市达峰路径和碳中和愿景的研究较少,城市的低碳方案与温室气体排放的物理特征以及经济发展之间的联系研究则更少^[14]。更多的学者近年集中于不同经济模型、减排路径下国家层面的技术发展路径、战略部署、技术方法和相关市场政策机制等研究^[15]。

为了对城市低碳发展路径提供更多的实践基础和理论支持,同时为国家探索碳中和路径提供实践经验,本研究梳理并分析东京、巴黎、纽约、伦敦这4个大都市的气候行动计划/战略,科学评估北京市能源消耗和碳排放特点,总结北京与国际城市的发展与排放差异,结合模型测算与《巴黎协定》全球减排目标,探讨北京市碳中和目标及实现路径,为城市碳中和研究提供有力支撑。

1 国际大都市碳中和目标及路线图分析

国际上重要的4个世界级大都市^[16],均对外表态在2050年实现碳中和。东京市政府发布《东京零排放战略》^①和《东京2020年零排放更新战略》^②,纽约对外发布《1.5°C让纽约遵守巴黎气候协定》^③和《纽约2050:一个强大而公平的城市》^④,伦敦制定《零碳伦敦:1.5°C兼容计划》^⑤和《伦敦环境战略实施计划》^⑥,以及巴黎发布《巴黎市气候行动计划——迈向碳中和城市》^⑦和《巴黎,2050年迈向碳中和的变革之风》^⑧的气候行动计划。

1.1 四大都市的碳排放核算基本情况

东京、纽约、伦敦和巴黎都是C40城市集团(简称C40)成员。纽约采用了C40推荐的《城市温室气体核算国际标准》^⑨(Global Protocol for Community-scale Greenhouse Gas Emission Inventories,简称GPC)进行温室气体排放量核算,东京、伦敦和巴黎采用的是根据自身排放特征优化的GPC方法^[17-20](表1),核算范围较GPC方法更广更符合物理事实。GPC方法确定的“范围1”是不包括外部输入能源在内的最小边界内的碳排放,“范围2”是考虑外部电网(如电力)提供的能源范围,“范围3”是包含跨境运输(如境外航空等)等在内的全领域能源消费范围。

1.2 碳中和主要实施路径及实现措施

根据温室气体排放特点和气候变化影响评估,东京、纽约、伦敦和巴黎确定了2050年实现碳中和的目标。东京明确2030年实现温室气体排放量较2000年下降50%和2050年实现零排放的2个阶段性目标,且在2050年实现100%可再生能源利用。纽约确定2030年温室气体排放量较2005年降低40%,2050年减排80%。伦敦承诺以1990年为基准年,2025年实现温室气体减排60%,2050年减排80%且实现碳中和。巴黎则以2004年为基准年,承诺2030年减少50%,2050年减排80%。从减排量下降曲线看(图1),东京的减排力度最大,4个城市后30a的减排力度较前20a均

表1 四大城市温室气体排放计算方法及边界情况

城市	人口/万人	面积/km ²	人均GDP/(美元/a) ¹⁾	温室气体排放计算方法	计算范围 ²⁾	计算领域
东京	1374	2194	69524	build-up method ^[17]	1、2、3	工业、商业、居民、交通、其他
纽约	855	789	69915	GPC ^[18]	1、2、3	固定能源、交通、固体废弃物
伦敦	889	1572	53157	LEGGI ^[19]	1、2	居民、商业-工业、交通
巴黎	224	105	57241	Bilan Carbone ^[20]	1、2、3	工业、第三产业、居民、交通、废弃物、食物

注:1)人均GDP数据来源于2014年《巴黎,2050年迈向碳中和的变革之风》报告(<http://paris2050.elieth.com/en/>);2)指GPC方法所列出的范围内容。

① https://www.kankyometro.tokyo.lg.jp/en/about_us/zero_emission_tokyo/strategy.html[2021-09-20]

② https://www.kankyometro.tokyo.lg.jp/en/about_us/zero_emission_tokyo/strategy_2020update.html[2020-08-30]

③ <https://climate.cityofnewyork.us/reports/1-5-aligning-new-york-city-with-the-paris-climate-agreement/>[2021-09-20]

④ <https://climate.cityofnewyork.us/reports/onenyc-2050/>[2021-09-20]

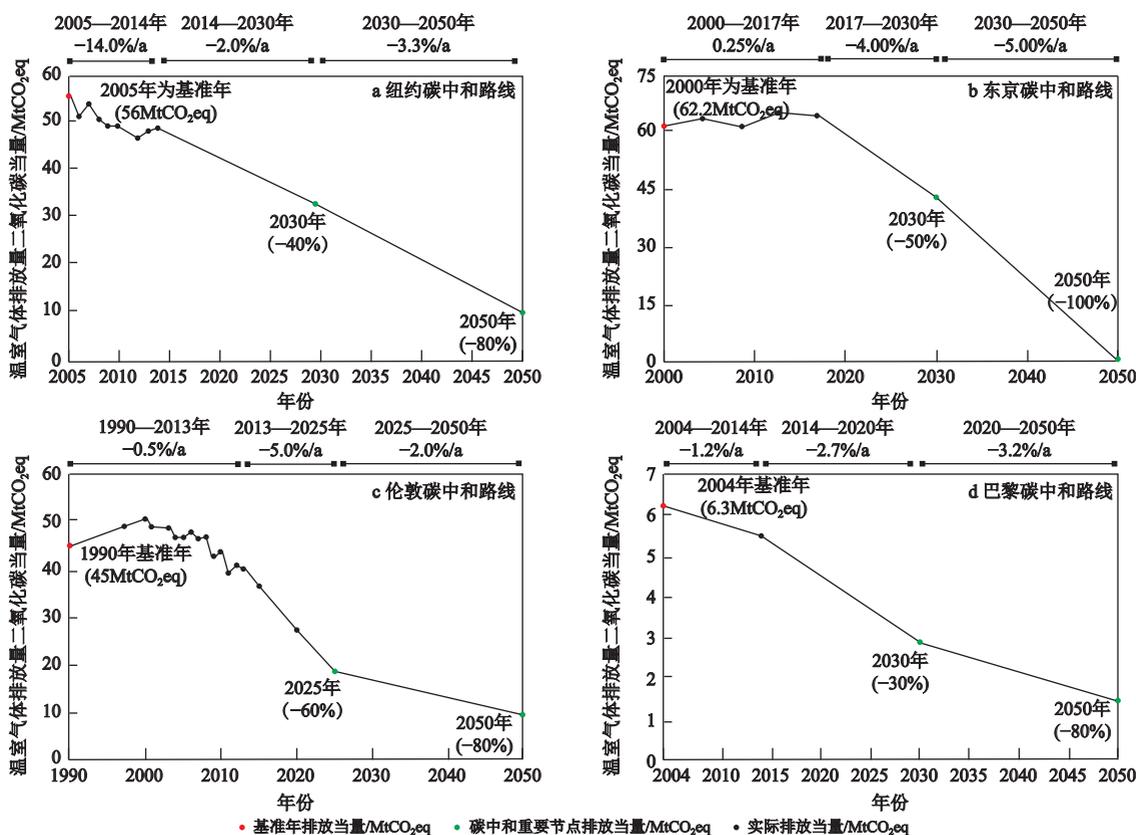
⑤ www.climateaction.org/news/mayor-of-london-unveils-1.5c-climate-action-plan[2021-09-20]

⑥ <https://www.london.gov.uk/programmes-and-strategies/environment-and-climate-change/london-environment-strategy>[2021-09-21]

⑦ https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Paris-Climate-Action-Plan-Towards-a-carbon-neutral-city-and-100-renewable-energy?language=en_US[2021-09-22]

⑧ <http://paris2050.elieth.com/en/>[2021-09-21]

⑨ http://www.iclei.org/fileadmin/user_upload/ICLEI_WS/Documents/Climate/GPC_12-8-14_1.pdf[2021-09-20]



2030年(-30%)表示2030年较基准年排放量减少30%,其他以此类推

图1 纽约、东京、伦敦、巴黎碳中和路线

Fig. 1 The roadmap of zero carbon neutrality for New York, Tokyo, London and Paris

大1倍以上。

城市化进程达到一定程度,能源、建筑、交通、居民生活等成为城市温室气体排放的主要来源,因此大力发展可再生能源和新能源是走向碳中和的必选项,建筑领域和交通领域的低碳化改造及更新、发展循环经济和减少废弃物等是关注的重点,将增加城市绿化面积、加大林地建设等作为吸收温室气体排放的主要工程。因此,城市为实现碳中和实施的减排措施具有共性,分为五大类(表2):①建筑领域,既有建筑实行节能改造,新建建筑大力推广超低能耗建筑或零碳建筑,制定严格的建筑标准;②交通领域,全面推广新能源汽车,辅助要扩充充电桩、加氢站等基础设施;③能源结构转型,由传统的化石能源体系转变为以可再生能源如风电、太阳能、氢能、核能等为主的新能源体系;④加强废弃物的循环利用率,巴黎和伦敦均提出了零废弃物的目标,一方面减少污染,一方面可实现循环经济;⑤提升城市生态系统碳汇能力,增加城市绿岛、城市水域面积等。另外,不同发展形式对城市资源环

境产生的影响不同,结合自身需求和特点,各城市针对性的提出发展需要解决的问题,比如巴黎提出了建立可持续发展的食物体系、绿色饮食等解决粮食问题;伦敦和东京则强调大力发展绿色金融,利用市场手段解决资金问题等。

2 北京能源消费活动碳排放情况

2.1 能源消耗碳排放计算方法

碳排放核算方法采用分能源品种消耗量法^[21],以能源活动二氧化碳排放量为主,即指化石燃料(煤炭、石油、天然气)的排放量及电力调入调出所蕴含的排放量。其中,燃煤排放量=当年煤炭消费量×燃煤综合排放因子,燃油排放量=当年油品消费量×燃油综合排放因子,燃气排放量=当年天然气消费量×燃气综合排放因子,电力排放量=调入电量×调入省份电网平均排放因子-本地调出量×本地区省级电网平均排放因子。各种能源指标煤参考系数采用年度《中国能源统计年鉴》(<https://www.shujuku.org/china-energy-statistical-yearbook.html>)附录值,

表 2 四大国际城市碳中和目标及主要政策措施

序号	城市	基准年/温室气体排放量	实现路径	政策措施
1	东京	2000年/ 62.2Mt	① 2019—2030年,为实现30%的温室气体排放量的下降目标,进行加速推进行动,通过能耗提升和可再生能源的利用,能耗总量较2000年下降38%;② 2030—2050年,实现碳中和,100%实现脱碳能源,形成新的社会发展体系和新技术体系,通过森林吸收和技术变革降到最低碳排放,最后通过抵消实现碳中和	① 能源领域:最大比例的使用可再生能源、氢能,提高能源管理效率;② 基础设施领域:100%零排放住宅和建筑改造,交通100%使用零排放车辆;③ 资源利用\工业领域:实现塑料和其他资源的可持续利用,将生产、运输和消费环节的环境负荷最小化,杜绝食物浪费,实现HFCs零排放;④ 适应气候变化:将气候变化的危害最小化,气候变化预测高精细化;⑤ 全民行动与保障:加强与社会各界、国际间城市、其他地方市政府的合作;加强绿色金融市场建设
2	纽约	2005年/ 64.85Mt	① 2020年后实行必要的可衡量的短期行动,通过提升建筑标准、100%可再生能源的城市电力供应、充电设施建设等降低可测量的温室气体排放;② 实行可衡量的短期行动的同时,实行必要的短期增速行动,主要通过碳定价、财政项目、提升的气候变化社交等加速实现;③ 2040年后进入加速路径,通过不懈的努力和不断的评估进展和战略来实现长远气候行动目标;④ 最终实现碳中和,从技术上抵消剩余的排放实现可行的城市减排	① 制定法规,改建电力设施,扩建分布式能源;② 倡导使用公共交通、自行车及步行,支持汽车电动化,实行交通拥堵费;建立情节、安全和可负担性的高能效交通网络和遍布全城的电动汽车充电网络;③ 提高能效水平,用可再生能源或高效的电力系统取代建筑物中许多以化石燃料为基础的供暖和热水系统,向以可再生能源为基础的电网过渡;④ 对市政建筑节能、可再生能源、电动汽车和固体废物管理进行投资;实现零垃圾填埋、零废弃物,实现城市循环经济;⑤ 最大限度的发挥公民的作用,鼓励全民参与
3	伦敦	1990年/ 45.36Mt	① 近期路径(2018—2023年),通过发展清洁电力、提高能效和开发低碳技术实现减排;② 中期路径(至2040年),在2040年建成零排放公交体系;③ 远期路径(至2050年),建成清洁能源体系,交通全面电动化	① 开展全市建筑能效改造;② 电网、气网的低碳化改造;减少天然气用量,发展清洁电力;③ 控制新增能耗,规定所有新增用能需求必须通过能耗提升或者智能技术来抵消;④ 制定2025年的低碳供热路径;推广地热、海洋能和空气源供热技术进行居民供热,开展建筑余热捕捉;⑤ 2040年前市民绿色出行比例80%,2050年道路交通领域将实现全面电动化,能源全面清洁化
4	巴黎	2004年/ 28.3Mt	① 2020年是加速发展阶段,迫切的能源变革需求;② 有效行动阶段(2020—2030年),开发雄心勃勃的可实施的行动计划;③ 愿景(2030—2050年),将巴黎打造成韧性、包容、碳中和城市,实现100%可再生能源	① 能源领域:建立能源新政策;发展太阳能、风力和生物质发电;开发地下能源存储系统;2050年能源消费降低50%,可再生能源占比100%;2030年前所有能源系统完成智能改造,节能50%以上;② 交通领域:2020年建成骑行友好城市,2025年淘汰柴油车;2040年淘汰汽油车,支持建设远程办公中心;③ 建筑领域:修改现行法规,对既有建筑进行能源改造,推广新节能标准和规范;2050年,完成100万户生态改造,所有新建建筑均为低碳、主动能源建筑;④ 城市规划:调整规划以适应气候变化,城市规划和土地利用规划中推广碳中和示范项目,改善城市生态空间和人居环境;⑤ 废弃物处置:2020年将回收站数量增加到20座,堆肥站增至1000座;⑥ 食品行动:到2030年将食品相关的温室气体排放降低40%

不同种类化石能源的二氧化碳排放因子,采用国家最新温室气体清单排放因子,煤炭为 2.66 tCO₂/标煤,油品为 1.73 tCO₂/标煤,天然气为 1.56 t CO₂/标煤,电网排放因子采用华北电网当年度发布的排放因子^①值。

2.2 能源消费碳排放量对比分析

北京市行政辖区面积 16410 km²,常住人口 2153 万人,2019 年全市 GDP 为 35 371.3 亿元^[10]。与伦敦等城市相比(表 3),北京的常住人口最多,市域面

积最大,但人均 GDP 最低。

2000—2019 年能源消费量、分能源品种消费量、万元 GDP 能耗等数据均来自于《北京市统计年鉴》^[10]。北京市 2000—2019 年的能耗总量逐年增长(图 2),年增速 1%~7%,2004 年年增速最大为 10%。万元 GDP 能耗逐年下降,由 2000 年的 2.87 t 标煤/万元降到了 2019 年的 0.23 t 标煤/万元,能耗效率提高明显。北京市能源消耗碳排放量自 2000—2012 年持续上升到达最高点后,自 2013 年

① 数据引自国家发改委和生态环境部网站公开发布的《中国区域电网基准线排放因子》。

表 3 北京与纽约、伦敦、东京、巴黎基本情况对比

Table 3 Basic situation of Beijing, New York, London, Tokyo and Paris

城市	人口/万人	人均GDP/万美元	市域面积/km ²	人口密度/(人/km ²)
北京	2189	2.4	16410	1312
纽约	855	6.9	789	10800
伦敦	854	5.4	1572	5400
东京	1392	6.6	2155	15481
巴黎	224	5.7	105	21200

注: 表中的北京数据根据《北京市统计年鉴》^[10]获得, 纽约、伦敦、巴黎为2014年GDP计算得到, 东京的数据来自于2016年公开统计数据(<https://www.toukei.metro.tokyo.lg.jp/tnenkan/2016/tm16q3e001.htm>)。

起呈稳定波动并缓慢下降趋势(图2)。结合产业结构水平、经济发展水平、人均GDP等情况, 初步认为北京市碳排放总量处于波动下降的平台期^[22]。分能源品种来看(图3), 得益于北京市大气污染治理对于燃煤的压减, 自2000年以来煤炭消费及燃煤碳排放直线下降, 2019年燃煤碳排放占比只有2%左右。燃煤的减少带来天然气和电力等其他能源消耗的增加, 燃气、电力和油品的碳排放直线上升, 尤其是电力消耗碳排放放在2019年达到了总碳排放量的1/3以上。由于航空规模的扩大以及城市汽车保有量的持续提升, 燃油碳排放从2000年直线上升, 到2019年排放占比接近30%。从排放领域来看(图3), 随着城市化进程不断提升, 三产成为主要发展支柱的同时, 带动城市交通、建筑碳排放量逐渐增大并成为最大的2个排放领域, 产业结构的逐步优化使得工业产生的碳排放占比逐渐减小。

从能效水平来看, 北京与国际城市有明显的差距。北京与纽约的人均一次能源消费量基本上都在4.7t标煤/人, 伦敦、东京、巴黎则为3.0t标煤/人^①。单位GDP能耗水平, 北京约为0.14t标煤/千国际

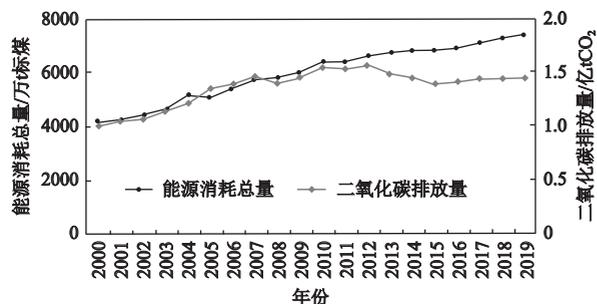


图2 北京市能源消耗总量和碳排放总量变化趋势

Fig.2 Change trend of total energy consumption and carbon emission of Beijing

元^①, 伦敦、纽约、东京、巴黎的水平较为接近, 约为北京的1/3。一次化石能源消费占比高是导致北京能源利用水平低于其他城市的主要原因。2019年北京市^[10,23]油品和天然气消费占比超过60%, 可再生能源比重只有7.9%左右。而伦敦2017年可再生能源电力占比已经达到了14.1%, 纽约2017年的清洁电力占比达到了27%, 巴黎2014年可再生能源的消费比例就达到了15.6%^[20]。可以看出, 北京市的能源利用效率、新能源及可再生能源的利用潜力仍有极大的提升空间。

从人均碳排放情况来看, 北京市的人均碳排放量保持在7~9 tCO₂/人左右, 处于较高的水平, 巴黎约为2.42 tCO₂/人, 伦敦约为4.63 tCO₂/人, 纽约为6.08 tCO₂/人, 东京约为4.70 tCO₂/人。从单位GDP碳排放来看, 北京约为3.00 tCO₂/万美元, 纽约、伦敦、东京的水平较为接近, 分别为1.1、1.2、1.4 tCO₂/万美元左右, 巴黎在2.4 tCO₂/万美元左右。从人均碳排放和万元GDP碳排放强度来看, 北京与其他城市差距明显。需要注意的是, 在城市终端能源消费中, 电力是这几个城市能源消费最为重要的能源品种, 电力系数对于城市碳排放数据影响较大。北京的电力碳排放系数在各城市中水平最高, 超过0.8 kg/kWh^①, 东京为0.5 kg/kWh^[24], 纽约为0.26 kg/kWh^[18]。这也是造成北京市人均碳排放和单位GDP碳排放较高的原因之一, 表明北京市未来电力供应的脱碳化进程还有待进一步提升。

3 北京实现碳中和目标及路线分析

根据国际能源署发布的《全球能源部门2050年净零排放路线图》, 2050年全球CO₂降至净零排放, 与控制全球平均温度的长期增长不超过1.5℃

① 国家发改委能源研究所. 国际大都市绿色低碳发展比较研究. 内部研究资料.

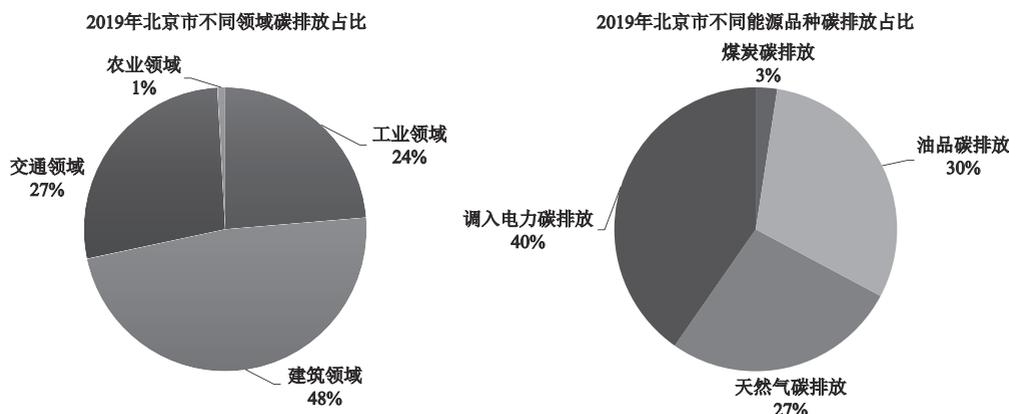


图3 2019年北京市分能源品种和分领域碳排放占比情况

Fig.3 The proportion of carbon emission by energy type and sector of Beijing in 2019

的目标才能保持一致。为此全球需要采取里程碑措施(图4): 2021年全球开始不应再批准开发无减排措施的新燃煤电厂、不再批准新煤田或煤田延期; 2025年全球停止销售新的化石燃料锅炉; 2030年在能普遍可及的情况下, 新能源技术发展进入大规模示范期, 全球汽车销量中电动车占60%, 太阳能和风能装机年增量1000GW以上, 发达经济体淘汰煤炭; 2035年停止销售新的内燃机汽车, 发达经济体电力总体实现净零排放; 2040年50%的现有建筑物完成“零碳”改造, 50%的航空燃料为低排放燃料, 全球电力实现净零排放及燃煤燃油电厂全部淘汰; 2050年超过85%的建筑物实现“零碳”排放, 超过90%的重工业生产实现低排放生产, 近70%全球发电总量来自太阳能光伏和风能, 二氧化碳捕获量达到7.6Gt等。

城市碳中和的实现受到人口、经济、产业结构、能源结构、技术、政策与市场等多因素影响^[25], 其中能源结构和产业结构是内在驱动因素。通过国际城市的碳中和行动和国际能源署全球零碳排放战略部署可以看出, 终端能源消耗低碳化、能源利用效率提升是碳中和必然要求, 在此基础上带动的低碳技术进步和创新是必然结果。对于北京来说, 要考虑城市发展共性和差异性^[26], 实现碳中和要以本地碳排放特点为基础, 结合国家“3060”目标^[27-29], 以碳排放总量稳中有降, 碳中和迈出坚实步伐的发展目标为导向, 以近、中、远期发展相结合, 以能源强度的降低为控制碳排放的主要抓手, 将重点行业和领域对碳排放和能源消费的重要影响作为主要考量因素, 将创新技术作为重要支撑,

科学统筹推进。

3.1 关于碳中和目标

相比国家而言, 北京市化石能源结构内部调整已基本完成, 三产占比已经达到了83%以上, 在2020年全国GDP受疫情影响明显的情况下, 金融业、高端医疗制造业、互联网经济、信息网络等有效支撑了北京市的经济增长^[10]; 完成了两轮次平原百万亩造林工程, 碳排放市场机制规范运行近10a, 再加上科技、人才的优势, 北京市在实现碳中和目标的基础条件上较国家有利。以北京市“十四五”规划《纲要》设置的经济发展目标、碳排放目标、能源目标为自变量, 采用经济和能源外推法, 预测2022年疫情全面好转后, 北京能源消费和碳排放水平将逐步恢复, 但在全局的能源结构和能源供应都将向明显的清洁化转变的大环境下^[30], “十四五”期间北京能源消耗产生的碳排放将不会高于“十三五”水平, 即2012年最高水平。主要是由于, 首先, 北京市的碳排放与经济发展之间呈现弱脱钩关系^[31-32], 经济恢复对碳排放的压力较小。其次, 北京市“十四五”相关规划中已明确提出到2025年能源总量要控制在8050万t标煤以内, 可再生能源占比提高到14.4%, 以及外调绿电达到300亿kW等目标, 在此条件下测算北京市的碳排放总量将会达到1.2亿t左右, 也未超过2012年最高水平。再将“1+N”双碳政策措施叠加进行综合测算, 北京市至2030年前碳排放量均保持在1.3亿t左右, 也不会超过2012年最大值。在碳排放总量保持稳定波动, 结合北京高精尖产业持续发展要求, 可再生能源和外调绿电持续加大利用的情况下, 以及未来

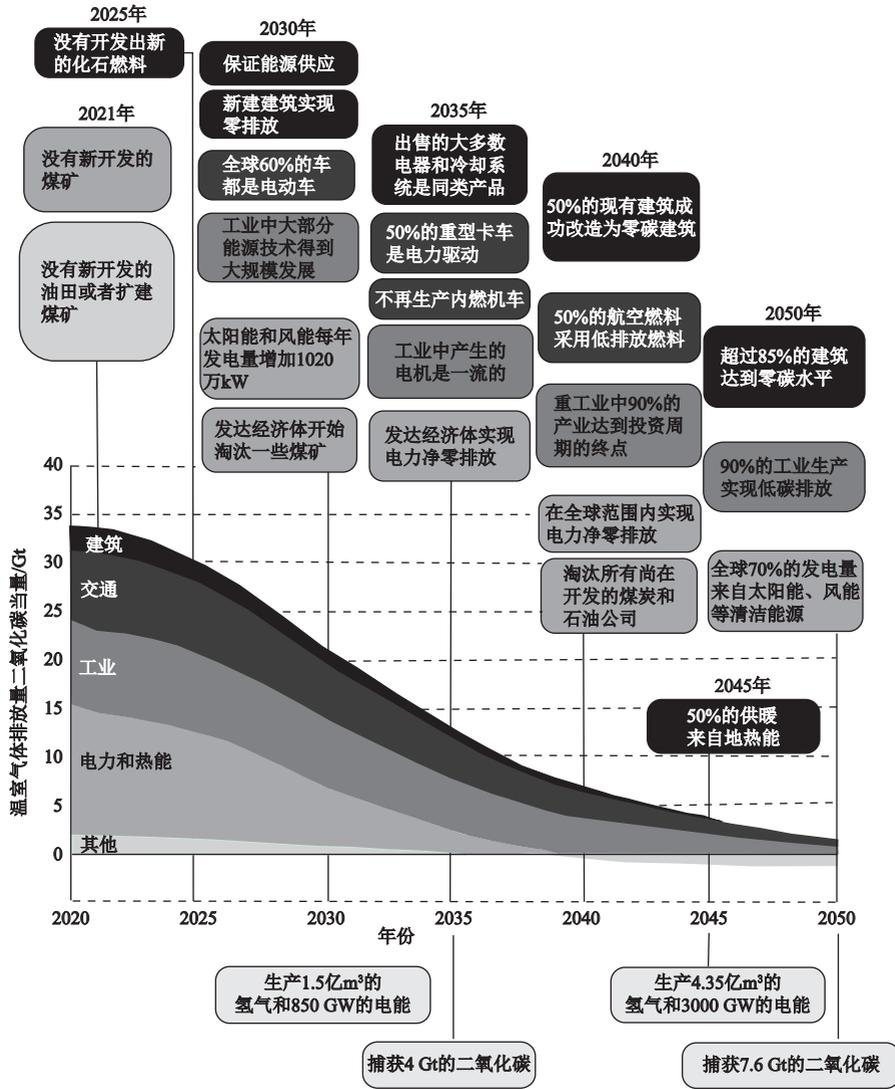


图4 全球净零路线中的关键里程碑

Fig.4 Key milestones in the global net Zero route

一流国际城市的定位, 科学研判碳排放水平在稳定波动的平台期的整体评估, 北京的碳中和目标应与伦敦巴黎等对标, 时间上比国家 2060 年目标会提前 5 a 或 10 a。

在减排量设定上, 伦敦按照《京都议定书》里的规定选择 1990 年作为基准年; 巴黎将其进行温室气体排放清单评价的起始年 2004 年作为基准年; 东京则是将能源消费达峰年 2000 年作为基准年; 作为第一个选择响应控温 1.5℃ 的城市, 纽约选择 2005 年为基准年。对于北京市来说, 能源达峰还未出现, 长时间尺度上的碳排放量自 2012 年以来呈现波动下降趋势^[33], 因此建议按照现有统计基础计算出的碳排放量最高年即 2012 年为基准年; 或者

考虑到国家 2020 年提出了碳中和的目标, 可考虑以 2020 年为基准年, 但 2020 年整年受疫情影响, 生产生活活动多处于停滞状态, 不能全面代表北京市的碳排放和能源消耗情况, 可以 2019 年为基准年。对于减排量来说, 受限于目前低碳技术进步以及对于未来技术不确定性判断, 国际上大部分国家和城市都选择在碳中和时实现减排量较基准年下降 80%~85%, 其他 15% 的排放量以碳捕获、利用与封存 (Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)、碳汇等形式实现中和, 因此在减排量上北京可与国际步调一致, 设定较基准年排放量下降 85%~90% 的阶段性目标, 剩下的 10%~15% 以 CCUS、碳汇、配额交易等实现。

分析北京市“十四五”规划《纲要》^①和《北京市总体规划(2016—2035年)》^②目标,结合 LEAP 模型分析结果^[34-35],森林碳汇量按照 260 万 t 考虑^[36],在国家 2060 年实现中和的外部条件支持下,初步测算北京市实现碳中和路线图(图 5),在 2055 年或 2050 年实现碳中和,实现路径分为 2 个阶段,第一阶段属于“快速减排”期,即 2020—2035 年碳排放总量持续下降,实现相对排放最大值的 35% 减排,到 2035 年碳排放总量控制在 9000 万 t 以内。第二阶段全面中和阶段,即 2035—2050 年/2055 年预计要完成 85%~90% 左右的减排量,到 2050 年/2055 年实现碳排放总量削减到 1000~1500 万 t 以内,以深度脱碳和碳捕集、增加林业碳汇为重点,能源和电力生产进入负碳阶段。从实现路径来看,北京的减排量力度将会较伦敦、巴黎等城市更为严格。

3.2 实现碳中和过程中的率先行动

整体路径确定后,以碳排放源为基础,确定实施措施。以北京市能耗和碳排放特征来看,建设清洁低碳、安全、高效的现代能源体系和现代经济发展体系是主要方向,以能源生产清洁化、能源消耗电气化、能源配置智能化等促进交通、建筑等重点领域低碳化发展,并带动技术创新和技术突破,是优先行动领域。

1) 加快城市能源低碳转型。东京^[24]和巴黎^[20]碳排放的主要来源为电力消耗,占比分别超过了 30% 和 20% 以上,纽约^[18]和伦敦^[19]排放来源则主要是天然气。北京能源碳排放主要来自电力和天然气(图 3),与东京和巴黎的来源较为一致。能源活动的脱碳关键是能源供应转向清洁主导、能源使用转向电力为中心的结构模式,将电力成为终端能源消费的核心载体^[37],由此东京和巴黎都将因地制宜发展新能源和可再生能源作为实现碳中和的重要途径。北京作为以化石能源消费为主的城市,能源结构优化是首选措施,实施清洁替代,优化电源结构,提前研究布局燃气电厂的定位发展,提高以风电、光伏、太阳能、氢能等为主的可再生能源的消费占比,从源头减少碳排放。由于经济还在持续增长,北京市的能源消费还未出现达峰^[38],逐步推动能源消费总量在 2030 年左右达峰是关键节点,峰值大约保持在 8500 万 t 标煤左右才能支撑 2035 年阶段目标的实现。在工业、交通、建筑等领域实施电能替代和能效提升方面,进一步加大新能源及可再生能源的使用比例。尤其作为以能源输入为主的城市,需优先引进绿电,按照 2019 年的能源消耗总量测算,外调电力排放占本市碳排放量的 40% 左右,要实现碳中和外调绿电比例需占外调电力的 95% 以上。针对本地可再生能源开发利用较低的情况,利

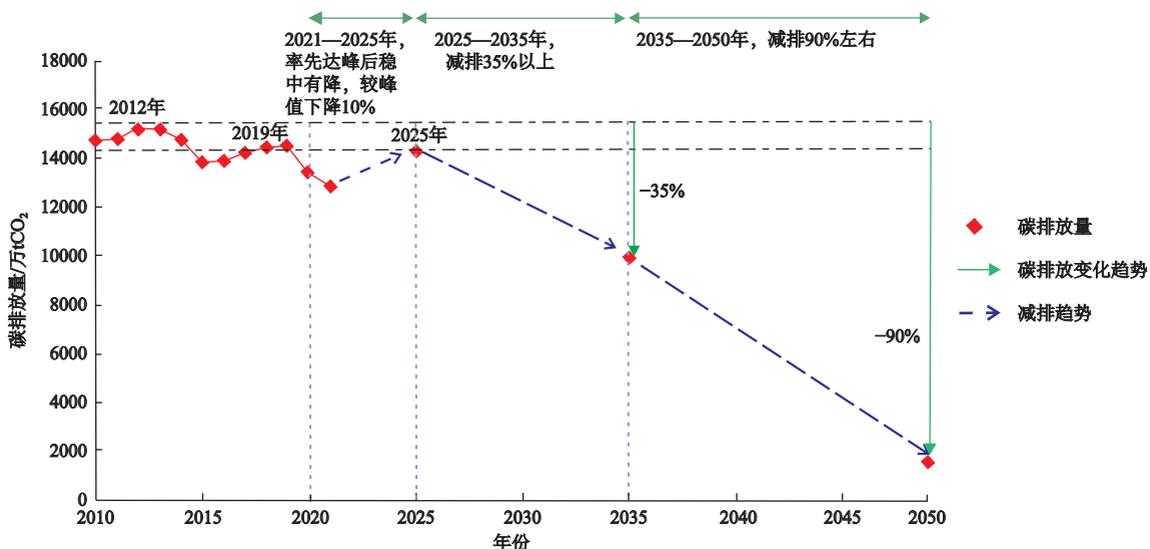


图 5 北京市碳中和路线

Fig.5 Roadmap of carbon neutrality for Beijing

① https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/202012/t20201207_2157969.html

② https://www.beijing.gov.cn/gongkai/guihua/wngh/cqgh/201907/t20190701_100008.html

用城市更新计划发展分布式能源供应体系,因地制宜开发风电、光伏及地热等本地可再生能源也很重要。

2) 实现建筑领域的低碳化。2019 年建筑领域碳排放占北京市总碳排放量的 48% 以上(图 3),因此建筑领域碳减排作用突出。建筑领域^[39]碳排放主要集中于居民生产生活燃气、用电等,实现脱碳的根本路径是提高建筑采暖(冷)、炊事和生产生活电气化水平。鉴于北京与东京在气候环境、能耗消费上更有相似性,东京在 2030 年左右实现建筑零排放,学习东京经验将建筑领域减排作为重要抓手,首先保证“十四五”建筑领域实现排放达峰,充分利用建筑技术方法和功能方式的进步,推行超低能耗建筑,实施智能建筑/电器管理系统,利用分布式能源将现有建筑能效提高一倍。改进建筑材料,采用地热、空气源和水源热泵、储能以及建筑光伏一体化等技术,最终实现供热、供冷低碳化。针对目前北京市的供暖系统资源浪费较大的问题,进一步优化管道设置及供热系统的规划,充分利用余热和地热资源,将供暖改造及早提上日程。

3) 推行交通领域低碳化。城市发展到一定经济水平,居民生活水平提升必定带动汽车保有量的增多,2019 年北京市机动车保有量达到了 636.5 万辆^[40],再加上城市物流、公共用车等活动水平的明显提升,导致陆地交通碳排放持续提升。作为重要的航空枢纽,航空燃油的逐年提高也是交通领域碳排放占比逐年增加的主要原因。交通领域的碳排放超过了北京市总排放的 25% 以上(图 3)。以石油为主的能源消费结构、不合理的运输结构是交通领域碳排放居高不下的主要原因^[40]。交通领域脱碳的根本出路是加快“以电代油”,大力发展新能源汽车。北京市 2025 年要实现 200 万辆新能源车的推广目标,结合电力供应的进一步低碳化,这将使得交通领域的碳排放预计下降 15% 左右,在此基础上逐步实现燃油汽车的替换,加大新能源充电设施的布局 and 数量,形成以电为中心的多能互补现代交通用能格局,从源头控制交通领域碳排放增速。其次,提升公众绿色出行比例到 90% 以上,加大公共交通建设力度,保证公共出行的基础能力。另一方面,物流方面通过“公转铁”调整运输结构,加快铁路电动化改造,推动轻型轨道列车等的电动化,对最终实现碳中和目标也是重要的支撑。学习巴黎和伦敦,划定低排放区,逐步实现严格的交通排放制度。在技术允许的情况下,逐步将生物燃料作为航空燃油

替代品,实现航空领域温室气体减排。

4) 加强技术创新。碳中和实现过程中,技术创新是最重要的外部动力。技术进步全面贯穿在国际碳中和行动计划中,凸显了技术在碳中和进程中的重要地位。北京作为科技创新中心,创新、技术和人才优势还有待进一步开发和利用。突破储能技术、CCUS 技术、氢能、核能、生物质能等技术的大规模应用瓶颈,探讨这些技术全面推广应用的时间进度安排,支持清洁技术行业的战略发展,加大对可再生能源的开发、利用及技术支持,发挥北京的智能研发聚集地的功能,将智能 AI 等技术充分应用到管理、制造等环节内,实现真正意义上的技术突破。

5) 发挥居民参与的作用。2019 年北京常住人口突破 2100 万。居民的能源消费和碳排放量占比相当大,要充分发挥好 2100 万人的积极性和主动性,才能根本上带动城市绿色发展。统筹“无废城市”建设,有效执行垃圾分类,发展循环经济,提高北京市年产 1000 万 t 垃圾^[41]的循环利用率。通过吸引居民参与到新能源和节能减排技术的利用和推广中来,可以有效促进北京市能源结构的优化。政府还应通过媒体等宣传绿色低碳的生活方式,通过财政补贴促进低碳产品和新能源技术的消费,构建舒适的公共交通条件,通过良好的社会氛围,促使公众自主参与发挥更大的主动性和积极性。

4 结论

北京的碳排放与经济社会发展处于弱脱钩状态,第三产业占比超过了 83% 以上,经济发展及碳排放特征与国际城市具有相似性。北京作为首都,未来定位是国际一流和谐宜居之都,结合国家提出的“3060”目标,碳中和之路势在必行。

1) 研究显示,北京经济发展带来的碳排放压力较小,能源消耗碳排放量进入了波动下降的平台期,能源结构、产业结构和单位 GDP 碳排放为全国最优,在国家提出 2060 年实现碳中和的目标下,北京良好的低碳发展和人才技术优势将利于其提前实现碳中和目标,较国家 2060 碳中和目标提前 5 a 或者 10 a 的设定下,实现路径分为两步,到 2035 年实现碳减排 35%,到中和时实现碳减排的 85% 以上,剩下的 10%~15% 的排放量由 CCUS、碳汇等实现抵消。

2) 在实现碳中和路径上,首先是降低能源领域、建筑领域、交通领域等重要领域的碳排放。能源供

应脱碳化、能源利用的低碳化,即“净煤、少油、减气、多绿电”是实现碳中和的主要原则。在能源绿色低碳化的基础上,建筑领域和交通领域充分利用科技进步与创新以及智能化管理等力求实现两大领域的实质性减排。其次,碳达峰碳中和被称为第三次工业革命,技术创新在碳中和实现过程中将起到巨大的作用,北京是国家科技创新中心,要充分应用科研院所集中的优势,大力发展科技创新,突破储能、氢能利用等技术瓶颈,打赢绿色发展转型的技术竞赛。最后需要全民参与,营造全民低碳的行动氛围,为碳中和提供有力的全民环境。

参考文献(References):

- [1] UNFCCC. The Paris Agreement[EB/OL]. 2015 [2020-08-20]. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>.
- [2] IPCC. Global warming of 1.5°C[R/OL]. 2018. <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
- [3] 张雅欣, 罗荟霖, 王灿. 碳中和行动的国际趋势分析[J/OL]. 气候变化研究进展, 2020. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5368.P.20201225.1606.004.html>. [Zhang Yaxin, Luo Huilin, Wang Can. Progress and trends of global carbon neutrality pledges. *Climate Change Research*, 2020. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5368.P.20201225.1606.004.html>.]
- [4] 秦大河. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理与适应国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2015. [Qin Dahe. China national assessment report on risk management and adaptation of climate extremes and disasters. Beijing: Science Press, 2015.]
- [5] 葛全胜. 中国历朝气候变化[M]. 北京: 科学出版社, 2011. [Ge Quansheng. Climate change in China in the past. Beijing: China Science Press, 2011.]
- [6] 张德二, Dearee G. 1743年华北夏季极端高温: 相对温暖气候背景下的历史炎夏事件研究[J]. *科学通报*, 2004, 49(21): 2204-2210. [Zhang Deer, Dearee G. Extreme summer high temperature in North China in 1743: A study of historical hot summer events in a relatively warm climate. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(21): 2204-2210.]
- [7] 杜吴鹏, 曹经福, 刘咪咪, 等. 华北区域气候变化评估报告: 2020决策者摘要[R]. 北京: 气象出版社, 2021. [Du Wupeng, Cao Jingfu, Liu Mimi et al. Regional climate change assessment report for North China: Summary for policy makers 2020. Beijing: China Meteorological Press, 2021.]
- [8] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2013: 1535.
- [9] 刘学之, 刘成, 马婧. 伦敦能源战略对北京建设世界城市的启示[J]. *环境保护*, 2012(7): 79-82. [Liu Xuezhi, Liu Cheng, Ma Jing. Inspiration of London's energy strategy to Beijing's construction of a world city. *Environmental Protection*, 2012(7): 79-82]
- [10] 北京市统计局. 北京统计年鉴: 2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021. [Beijing Statistical Bureau. Beijing statistical yearbook 2020. Beijing: China Statistics Press, 2021.]
- [11] 陈飞燕, 陆萍. 国际大都市中心城区的发展及其对上海的启示[J]. *城市道桥与防洪*, 2009(9): 198-201. [Chen Feiyan, Lu Ping. The development of central city of international metropolis and its enlightenment to Shanghai. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2009(9): 198-201.]
- [12] 孙尧光. 中国50个城市2000—2015年CO₂排放特征研究[D]. 南京: 南京大学, 2019. [Sun Yaoguang. Characteristics and driving forces of carbon emissions of 50 Chinese cities during 2000—2015. Nanjing: Nanjing University, 2019.]
- [13] 胡鞍钢. 中国实现2030年前碳达峰目标及主要途径[J/OL]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4558.G.20210125.0947.002.html>. [Hu Angang. China's goal of achieving carbon peak by 2030 and its main approaches. *Journal of Beijing University of Technology (Social Sciences Edition)*. 2021. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4558.G.20210125.0947.002.html>.]
- [14] Holtz-Eakin D, Selden T M. Stoking the fires? CO₂ emissions and economic growth [J]. *Journal of Public Economics*, 1995,57(1): 85-101.
- [15] 王楠, 谢文萱. 面向碳中和的京津冀城市群发展路径[J]. *企业经济*, 2021, 40(8): 44-52. [Wang Nan, Xie Wenxuan. A carbon-neutral development path for the Beijing-Tianjin-Hebei city cluster. *Enterprise Economy*, 2021, 40(8): 44-52.]
- [16] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World urbanization prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER. A/420)[R]. New York: United Nations, 2019.
- [17] 李燕, 顾朝林. 日本城市碳排放清单计算方法——以横滨市为例[J]. *城市环境与城市生态*, 2012, 25(12): 38-42. [Li Yan, Gu Chaolin. Method of estimating CO₂ emissions on city-level in Japan. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2012, 25(12): 38-42.]
- [18] Mayor of New York City. Inventory of New York City greenhouse gas emissions in 2016 [R/OL]. 2016.[2020-09-20]. https://www.sallan.org/pdf-docs/NYC_greenhousegas_2010.pdf
- [19] Mayor of London. London energy and Greenhouse Gas Inventory (LEGGI) [R/OL]. 2019.[2020-09-20]. <https://data.london.gov.uk/dataset/leggi>
- [20] Mayor of Paris. 2004—2014 assessment of Paris climate and energy [R/OL]. 2014. [2020-09-20]. <https://cdn.paris.fr/paris/2022/06/14/94cc71963334fdeb17dc64da8756aae8.pdf>
- [21] 王乾. 京津冀能源消费、碳排放与经济增长关系研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016. [Wang Qian. Research on the relationship of energy consumption, carbon emissions and economic growth in Beijing-Tianjin-Hebei Region. Beijing: Beijing Institute of

- Technology, 2016.]
- [22] 李惠民, 张西, 张哲瑜, 等. 北京市碳排放达峰路径及政策启示[J]. 环境保护, 2020, 48(5): 24-31. [Li Huimin, Zhang Xi, Zhang Zheyu et al. The pathway and policy implication of reaching peak of carbon emission in Beijing. Environmental Protection, 2020, 48(5): 24-31.]
- [23] 北京市节能环保中心. 2020年北京能源发展报告[R]. 北京: 环境能源出版社, 2020. [Beijing Energy Conservation and Environmental Protection Center. Beijing energy development report. Beijing: Environmental Energy Press, 2020.]
- [24] Bureau of Environment Tokyo Metropolitan Government. Final energy consumption and greenhouse gas emission in Tokyo [R]. 2020.[2020-09-20]. https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/en/climate/index.files/Tokyo_GHG_2019.pdf
- [25] 卢笛声. 中国低碳治理的制约因素和相应对策[J]. 地理科学, 2014, 34(3): 265-271. [Lu Disheng. Low carbon governance in China: Barriers and solutions. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(3): 265-271.]
- [26] 刘华军, 邵明吉, 吉元梦. 中国碳排放的空间格局及分布动态演进——基于县碳排放数据的实证研究[J]. 地理科学, 2021, 41(11): 1917-1924. [Liu Huajun, Shao Mingji, Ji Yuanmeng. The spatial pattern and distribution dynamic evolution of carbon emissions in China: Empirical study based on county carbon emission data. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(11): 1917-1924.]
- [27] 中国长期低碳发展战略与转型路径研究课题组, 清华大学气候变化与可持续发展研究院著. 读懂碳中和: 中国2020—2050年低碳发展行动路线图[M]. 北京: 中信出版社, 2022. [China's Long-term Low-carbon Development Strategy and Transition Path Research Group, Institute of Climate Change and Sustainable Development, Tsinghua University. Read carbon neutral: China's low-carbon development roadmap for 2020—2050. Beijing: CITIC Press, 2022.]
- [28] 王深, 吕连宏, 张保留, 等. 基于多目标模型的中国低成本碳达峰、碳中和路径[J]. 环境科学研究, 2021, 34(9): 344-355. [Wang Shen, Lyu Lianhong, Zhang Baoliu et al. Multi objective programming model of low-cost path for China's peaking carbon dioxide emissions and carbon neutrality. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(9): 344-355.]
- [29] 赵明轩, 吕连宏, 王深, 等. 中国碳达峰路径的Meta回归分析[J]. 环境科学研究, 2021, 34(9): 2056-2064. [Zhao Mingxuan, Lyu Lianhong, Wang Shen et al. Meta regression analysis of pathway of peak carbon emission in China. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(9): 2056-2064.]
- [30] 刘贤赵, 高长春, 张勇, 等. 中国省域碳强度空间依赖格局及其影响因素的空间异质性研究[J]. 地理科学, 2018, 38(5): 681-690. [Liu Xianzhao, Gao Changchun, Zhang Yong et al. Spatial dependence pattern of carbon emission intensity in China's provinces and spatial heterogeneity of its influencing factors. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(5): 681-690.]
- [31] 赵玉焕, 李浩, 刘娅, 等. 京津冀CO₂排放的时空差异及影响因素研究[J]. 资源科学, 2018, 40(1): 207-215. [Zhao Yuhuan, Li Hao, Liu Ya et al. Identifying driving forces of CO₂ emissions in Beijing-Tian-Hebei region from temporal and spatial angles. Resources Science, 2018, 40(1): 207-215.]
- [32] 王仲瑀. 京津冀地区能源消费、碳排放与经济增长关系实证研究[J]. 工业技术经济, 2017, 36(1): 82-92. [Wang Zhongyu. The empirical study on the relationship between energy consumption, carbon emissions and economic growth in Beijing-Tianjin-Hebei. Journal of Industrial Technological Economics, 2017, 36(1): 82-92.]
- [33] 钟良, 王红梅. 北京市碳排放达峰规律研究[J]. 气候变化, 2019, 41(4): 38-47. [Zhong Liang, Wang Hongmei. Study on peaking carbon emission in Beijing. Climate Change, 2019, 41(4): 38-47.]
- [34] Zhang D Y, Liu G Y, Chen C C et al. Medium-to-long-term coupled strategies for energy efficiency and greenhouse gas emissions reduction in Beijing (China)[J]. Energy Policy, 2019, 127: 350-360.
- [35] Liu G Y, Hu J M, Chen C C et al. Leap-weap analysis of urban energy-water dynamic nexus in Beijing (China)[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 136: 110369.
- [36] 姚仁福, 边文燕, 范宏琳, 等. 中国省域森林碳汇效率演进分析[J]. 林业经济问题, 2021, 41(1): 51-59. [Yao Renfu, Bian Wenyan, Fan Honglin et al. Analysis on the evolution of provincial forest carbon sequestration efficiency in China. Issues of Forestry Economics, 2021, 41(1): 51-59.]
- [37] 王丽娟, 张剑, 王雪松, 等. 中国电力行业二氧化碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(2): 329-338. [Wang Lijuan, Zhang Jian, Wang Xuesong et al. Pathway of carbon emission peak in China's electric power industry. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(2): 329-338.]
- [38] 钟良, 王红梅, 刘之琳. 北京碳排放尽早达峰及未来路径研究[J]. 气候变化, 2019, 41(11): 42-47. [Zhong Liang, Wang Hongmei, Liu Zhilin. Study on peaking of carbon emission in Beijing as soon as possible and future path. Climate Change, 2019, 41(11): 42-47.]
- [39] 袁闪闪, 陈潇君, 杜艳春, 等. 中国建筑领域CO₂排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(2): 394-404. [Yuan Shanshan, Chen Xiaojun, Du Yanchun et al. Pathway of carbon emission peak of China's building sector. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(2): 394-404.]
- [40] 黄志辉, 纪亮, 尹洁, 等. 中国道路交通二氧化碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(2): 385-393. [Huang Zhihui, Ji Liang, Yin Jie et al. Peak pathway of China's road traffic carbon emissions. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(2): 385-393.]
- [41] 施南德. 2060碳中和: 中国如何发挥城市的作用实现这一目标[J]. 中国发展高层论坛专题, 2021, 13: 21-30. [Shi Nande. 2060 Carbon neutral: How can China play its cities to achieve the goal. China Development Forum, 2021, 13: 21-30.]

Inspiration from the international metropolis' zero emission action plan to the carbon neutrality of Beijing

Yang Xiaoyan, Hu Yongfeng, Jia Qiumiao, Gao Jing, Qi Qi

(*Beijing Climate Change Management Center, Beijing 100086, China*)

Abstract: Climate change is a significant global challenge that humanity faces today. As the world's largest emitter, China's "3060" target reflects its responsible attitude as a major country and demonstrates strict requirements for local development. Compared to globally recognized world cities such as New York, London, Tokyo and Paris, Beijing has a certain space for development in addressing climate change, economic growth, urban construction, and other aspects. To scientifically explore the carbon neutrality target and the roadmap of Beijing, this article systematically sorted out the proposed carbon neutrality goals, realization paths and specific measures of the 4 international metropolises and compared the differences in energy consumption and carbon emission between Beijing and these 4 international metropolises. After considering Beijing's current economic development stage, carbon emission characteristics and future urban positioning, and combined with the LEAP model results, the roadmap and timetable of Beijing's carbon neutrality are proposed. Beijing should be achieve carbon neutrality by 2055 or 2050 to support the country's dual carbon goals. According to the principle of combining short-term and long-term goals with step by step, carbon emission will be reduced steadily after reaching the peak by 2025 and by 2035 it will be reduced by 35% compared with the base year. In the neutralizing year of 2055/2050, carbon emission would be reduced by 85%. According to carbon dioxide emission source characteristics, the main measures to achieve carbon neutrality for Beijing should focus on energy transformation, low-carbon buildings, green transportation, extensive public participation, and technological innovation.

Key words: carbon neutrality; international metropolis; emission reduction target