

城市碳中和措施的边际减排成本分析 ——以北京市为例^{*}

刘耕源^{1,2)†} 郭丽思¹⁾ 陈 钰¹⁾ 颜宁聿¹⁾ 孟凡鑫¹⁾ 李 慧¹⁾ 陈操操³⁾ 谢 涛⁴⁾

(1)北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 100875, 北京;

2)北京市流域环境生态修复与综合调控工程技术研究中心, 100875, 北京;

3)北京市应对气候变化管理事务中心, 100048, 北京; 4)北京雪迪龙科技股份有限公司, 102206, 北京)

摘要 城市是碳中和的主阵地, 随着“双碳”目标的提出, 将鼓励更多的减排技术和政策在城市低碳转型中发挥作用. 基于此, 本研究运用边际减排成本方法, 以北京市为例, 结合北京市低碳政策推广情况, 对具体减排技术的减排潜力和减排成本进行分析, 绘制了具有 35 项减排措施的北京市边际减排成本曲线, 识别出有较高经济性的优先减排措施, 为北京市实现碳中和目标提供技术措施优先级排序和实施路径建议. 研究表明: 1) 筛选出的电力部门、交通部门、建筑部门减排技术的减排潜力分别为 14.96 亿、7.66 亿、2.55 亿 t. 平均碳边际减排成本为 485.12 元·t⁻¹, 电力部门、交通部门、建筑部门的平均减排成本为 154.56、417.56、688.28 元·t⁻¹; 北京市应大力推广电力减排措施, 保证北京市碳排放进入快速下降通道; 2) 在 35 项减排措施中, 11 项的减排措施的边际减排成本为负, 成本有效的 CO₂ 减排潜力为 39967 万 t, 占 39.15%; 减排初期应大力推广电动出租车、电动公交车和电动轻型货车、照明节能等负成本措施; 3) 高边际减排成本措施的减排潜力较大, 但不具有成本优势, 实施难度大, 为促进此类减排技术的扩散, 政府可以采取一定程度的补贴或激励政策确保减排投资收益的稳定性, 降低减排投资风险.

关键词 碳中和措施; 边际减排成本; 电力部门; 交通部门; 建筑部门

中图分类号 X3

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2022212

0 引言

碳的边际减排成本(marginal abatement cost, MAC)是每减少一单位的 CO₂ 排放所需要支出的额外成本. 碳的边际减排成本曲线(marginal abatement cost curve, MACC)是展示宏观(国家、地区)或微观(行业、企业、城区)的减排潜力以及边际减排成本的常见工具, 助力气候政策决策^[1]. 国内外已有众多学者对边际减排成本展开研究: 第 1 类是“基于专家”的 CO₂ 减排成本模型, 这类型研究基于工程方案的思路, 使用所设定的基准情景为参照, 对不同国家、不同行业的各种减排措施进行技术评价, 计算其减排潜力和减排成本. 在这种计算方法中, 减排措施的渗透率及措施的节能减排量的数据都是通过专家或文献获取, 该方法经常被用来说明减排技术的经济有效性. 其中最有名的是麦肯锡在 2007—2010 年发布的一系列报告, 包括 14 个不同国家及全球边际减排成本曲线^[2-3]. 第 2 类则是“基于能源经济模型”, 主要有 CGE 模型^[4]、

MARKAL 模型^[5]、AIM 模型及其他综合评估模型^[6]. 此类研究通过模型模拟能源-经济系统在不同经济发展或能源政策情景下的经济产出及碳排放变化, 研究政策对边际减排成本的影响, 如碳税^[7]、化石能源价格波动^[8]. 第 3 类是“基于计量经济模型”, 如使用距离函数分析不同国家^[9]、省份^[10-11]、城市^[12-13]的碳边际减排成本及其差异特征. 在第 2 类及第 3 类研究中提到的边际减排成本, 常常被定义为碳的影子成本, 即在某个具体的时间段、某个经济客体由于碳排放约束而付出的经济代价, 如碳税、行业增加值或总产值损失^[14-15]. 但这里所说的成本是指一种经济代价, 与具体技术所需要投入的成本还不能直接划等号. 而第 1 类更关注具体的减排技术. “基于专家”的 MAC 曲线利用自底而上的数据来核算单独措施的边际减排成本, 此处边际减排成本不是指减排措施的全部成本和碳减排量的比值, 而是每项减排技术额外的减排成本(包括与替代技术比较额外的购置成本、能源成

^{*} 国家社科基金重大资助项目(22&ZD108); 国家自然科学基金资助项目(52070021); 广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2019A1515110816)

[†] 通信作者: 刘耕源(1983—), 男, 博士, 教授. 研究方向: 城市代谢与生态管理. E-mail: liugengyuan@bnu.edu.cn

收稿日期: 2022-06-15

本和运维成本)与技术寿命期内的碳减排量的比值. 基于能源-经济模型构建的 MAC 曲线一般是连续曲线. “基于专家”的 MAC 曲线可以将低碳技术按照减排成本从低到高的顺序依次排列, 呈现“阶梯状”, 同时展示出一系列低碳技术的减排成本和累积减排潜力, 为技术筛选及路径规划提供支撑^[16].

近年来, 许多学者使用“基于专家”的边际减排成本法构建了各部门 MAC 曲线, 包括乘用车^[17]、水泥^[18]、农业^[19]、建筑部门^[20]和可再生能源发电^[21]等. 研究表明, 从行业角度来看, 具有 $MAC \leq 0$ 的减排措施在其寿命期间同时具有经济竞争力和减排潜力, 且推广难度较低. 也有研究计算了 22 项航运减排措施的边际减排成本和减排潜力^[22], 结果表明, 由于成本效益原因, $MAC \leq 0$ 的措施实施率更高, 为 25%~50%; 而 $MAC > 0$ 的减排措施中 70% 的实施率不超过 5%, 市场推广缓慢. 有些研究也指出, 考虑到碳税、其他社会成本等, 与碳市场相关的措施(例如 CCER 和碳交易)可以提高正 MAC 措施的竞争力^[7].

上述研究一定程度上丰富了边际减排成本的研究成果, 并提供了数据支撑, 对于帮助理解减排措施或政策的实际减排潜力与成本具有重要意义, 但也存在不足: 1) 部分研究对于城市等宏观层面的研究大多应用总量数据, 并未结合地区特点及技术推广情况, 缺乏深入分析; 2) 缺少对边际减排成本差异进行进一步的分析, 可能会低估减排措施难度. 本研究使用“基于专家”的边际减排成本法, 选取北京市为案例, 基于地区减排措施推广特点及相关政策规划, 筛选具有代表性的城市关键减排技术. 根据已发布规划或相关研究报告, 对减排技术的渗透率及减排效率进行预测, 按年均成本法估算减排措施的边际减排成本, 并绘制边际减排成本曲线. 最后, 针对北京市走向碳中和最重要的电力、交通与建筑部门低碳/零碳技术措施, 提出技术措施优先级排序和实施路径建议.

1 边际减排成本分析方法学

1.1 减排成本计算模型 根据 Schäfer 等^[23]研究, 边际 CO_2 减排成本等于相对于基准情景因实施减排技术而增加的成本与碳减排量的比值. 具体计算公式为

$$C_{MA} = \frac{\Delta C}{\Delta R} = \frac{\Delta K + \Delta C_{operat}}{\Delta R}, \quad (1)$$

$$\Delta C_{operat} = \Delta C_{energy} + \Delta C_{O\&M}, \quad (2)$$

式中: ΔC 是减排技术的增量投资成本; ΔR 为碳减排量; ΔC_{operat} 是减排技术的增量运行成本; ΔK 是减排技术的碳减排量; ΔC_{energy} 是燃料成本差值; $\Delta C_{O\&M}$ 是运维

成本差值, 由于运维成本在总成本中占比很小, 可忽略不计. 所以投入一项减排技术带来的增量成本等于投资成本增加量减去能源节约收益.

以北京市为研究对象, 计算 35 项减排技术的边际减排成本. 由于不易计算所有减排措施全生命周期成本, 本研究使用资本回收系数计算减排技术增量成本的等额年值^[23], 公式为

$$C_{annual} = K_{\text{delta}} \frac{(1+d)^L \times d}{(1+d)^L - 1} + C_{energy} + C_{O\&M}, \quad (3)$$

$$C_{energy} = C_{AET} - C_{ET} = e_1 \times p_1 - e_2 \times p_2, \quad (4)$$

式中: C_{annual} 为减排技术增量成本的等额年值; d 为折现率; L 为技术寿命期限; C_{AET} 为减排技术能源费用; C_{ET} 为原有技术能源费用; e_1 为替代能源消耗, 若不存在能源替代, 则 $e_1=0$; p_1 为替代能源单价; e_2 为原有技术能源消耗; r 为技术节能率; p_2 为原有技术能源单价.

对于交通部门而言, 碳减排措施主要分为提高能源效率和使用清洁能源. 例如: 提高交通运输工具能源效率可以通过节省燃油减少 CO_2 排放; 使用电动车的减排量与电力排放因子有关, 电力 CO_2 排放因子越高, 电动车减排量越低; 同样, 氢燃料汽车的减排量与氢气生产、运输碳排放有关. 因此, 交通部门减排措施 i 在研究期内的碳减排量为

$$R_i = s_i \times \sum_{v=1}^l (E_v \times F_{\text{fuel}} - E_{\text{alter},v} \times F_{\text{alter},v}), \quad (5)$$

式中: s_i 为使用新减排技术 i 的交通设备销量; l 表示设备寿命; v 表示设备年龄; E_v 表示减排技术 i 的年节能量; F_{fuel} 是燃料碳排放因子; $E_{\text{alter},v}$ 是电动车或氢燃料汽车的能耗; $F_{\text{alter},v}$ 是第 v 年替代能源碳排放因子.

对于建筑部门而言, 可以通过使用更高效的电器或者使用电力替换天然气等来减少碳排放. 因此, 建筑部门减排措施 j 在研究期内的碳减排量为

$$R_j = A_j \times \sum_{v=1}^l (E_v \times F_{\text{fuel}} - E_{\text{Ele},v} \times F_{\text{Ele},v}), \quad (6)$$

式中: A_j 为使用新减排技术 j 的建筑面积; l 表示设备寿命; v 表示设备年龄; 当使用更高效的器具时, E_v 表示减排技术 j 替代原有技术的年节能量; 当涉及电能替代时, 须计算电力的间接碳排放, $E_{\text{Ele},v}$ 是减排技术 j 的年用电量; $F_{\text{Ele},v}$ 是当年电力碳排放因子.

1.2 减排技术措施推广 为了充分体现北京市节能减排行动现状与发展, 本文选取 2015 年作为基准年份. 结合北京市 2015—2022 年节能减排行动, 以及新

发布的《北京市“十四五”时期应对气候变化和节能规划》《北京市“十四五”时期能源发展规划》《北京市“十四五”时期交通发展规划》等专项规划,选取具有代表性的4项电力减排技术、16项交通减排技术、15项建筑部门建筑技术,为准确计算减排技术MAC,需要明确作为参照的基准技术,并确定减排技术的现有普及率及减排效率、成本^[24]等。有研究认为减排技术未来渗透率一定程度上影响减排潜力和边际减排成本^[22]。普及程度越高,技术累计减排潜力越大。本文根据技术推广的实际情况及未来预计渗透率,对减排技术的MAC进行计算。

1.2.1 电力部门的减排技术措施选择 根据北京市“十三五”“十四五”能源规划,能源结构调整思路为“减煤、稳气、强电、增绿”。其中,用燃气发电取代燃煤发电、大力发展本地可再生能源发电并逐渐减少燃气发电、同步扩大外调绿电规模是北京市电力部门实现碳中和的主要减排措施。

使用平准化发电成本(levelized cost of energy, LCOE)分析电力部门减排技术推广成本。LCOE指发电机组在建设运营周期内每kW·h的发电成本,是一种被广泛认可的发电项目成本计算方法。参考国际能源署报告^[25-26],结合相关文献^[27-28]设定燃煤发电,燃气发电、集中式光伏、分布式光伏、分布式风电等可再生能源发电的LCOE,具体参数如表1所示。扩大外调绿电规模的成本,取决于绿电交易溢价。本研究选取2021年首批绿色电力交易试点的绿电较火电的平均溢价40元·(MW·h)⁻¹作为外调绿电增量成本^[29]。

表1 电力部门发电技术成本参数

序号	技术	平准化发电成本/ (元·(MW·h) ⁻¹)	寿命/a	增量成本/ (元·(MW·h) ⁻¹)	文献
—	燃煤发电	494	40	—	[25]
A1	燃气发电	770	30	—	[27]
A2	集中式光伏	336	25	—	[26]
A3	分布式光伏	429	25	—	[28]
A4	外调绿电	—	—	40	[29]

根据北京市电力结构现状、相关规划文件和研究报告,对减排技术的未来装机量进行估算:2015—2020年,燃气发电不断取代燃煤发电;2020—2050年,随着本地可再生能源发电升高,北京禁止新增气电并且逐渐降低燃气发电量,同时不断增加外调绿电规模至1260亿kW·h。所以,本研究假定燃气发电的参照技术为煤电,光伏的参照对象为燃气发电。北京市光伏年利用时间取1242h^[30]。各类技术未来推广情况具体取值如表2所示。

表2 电力部门减排措施未来推广参数设定

年份	燃煤 年发电量/ (亿kW·h)	燃气 年发电量/ (亿kW·h)	集中式光伏 总装机/ 万kW	分布式光伏 总装机/ 万kW	绿电 年消费量/ (亿kW·h)
2020	6	384	5	64	100
2030	0	237	8	350	450
2040	0	97	13	925	780
2050	0	0	15	1500	1260

1.2.2 交通部门的减排技术措施选择 根据《北京市“十四五”时期交通发展规划》、行业政策文件^[31-32]及北京市交通发展研究院发布的《2021年北京市交通发展年度报告》^[33],北京市主要采取了以下3种措施降低交通部门碳排放:在运输结构调整方面,提高货物到发绿色运输比例;在积极引导低碳出行方面,继续实行小汽车限购、限行等交通管控手段,并提高公交、地铁、自行车、步行等绿色出行服务供给质量;在推广节能低碳型交通工具方面,推动车辆“油换电”,提高氢燃料电池车应用,推广可持续航空燃料的应用,提高燃油车能效标准,淘汰低能效运输工具。

根据北京市交通领域碳中和路径,并结合交通运输部发布的《交通运输行业重点节能低碳技术推广目录(2021年度)》^[34],选取汽车能效提升技术、纯电动出租车、纯电动公交车等16项具体减排技术进行边际减排成本研究。由于难以量化运输结构调整以及低碳出行相关减排措施的实施成本,所以相关减排措施不列入研究范围内。其中,研究假定电动车、氢燃料电池车等新能源车的参照技术为燃油车,可持续航空燃料的参照对象为传统航空煤油。

北京市交通部门减排措施的相关成本参数如表3所示。在减排措施的技术渗透率方面,按照北京市现有技术推广速率、相关规划文件^[35]及国际权威组织研究报告^[36]进行推算。各项技术的节能减排率与增量成本主要参考相关文献^[35-39]。

1.2.3 建筑部门的减排技术措施选择 按照建筑类型,将北京市建筑部门分为城镇居住建筑、公共建筑和农村居住建筑。研究筛选了15项建筑部门减排措施。在城镇居住建筑中,考虑既有居住建筑节能改造、空气源热泵、供热计量系统改造、电热水器、电炊具、节能电器、超低能耗居住建筑等减排措施。在公共建筑中,考虑既有公共建筑节能改造、空气能热泵、地源热泵、智能照明。农村建筑考虑既有农村建筑节能改造、空气源热泵。

建筑节能改造内容一般包括建筑围护结构节能改造和供热计量系统。经过围护结构节能改造,建筑

表 3 交通部门碳减排技术成本参数

措施	序号	减排措施	技术渗透率/%				节能减排率 ¹⁾ /%	增量成本/元	每百km技术能耗	年行驶里程/km	寿命/a
			2020	2030	2040	2050					
小客车能效提升	B1	发动机	60.0	80.0	100.0	100.0	14.0	14 181			
	B2整车	20.0	80.0	100.0	100.0	7.0	2 275		7.5 L	13 000	15
	B3变速器	10.0	20.0	30.0	40.0	9.0	16 000				
货车能效提升	B4	发动机	40.0	65.0	80.0	100.0	14.0	17 738			
	B5	空气动力学	60.0	80.0	100.0	100.0	12.0	11 610			
	B6	轻量化	60.0	80.0	100.0	100.0	9.0	25 800	39 L	150 000	
	B7	变速器	10.0	20.0	30.0	40.0	8.0	32 895			
燃油车电动化	B8	纯电动出租车	17.4	100.0	100.0	100.0	40.6	80 000	17 kW·h	84 000	6
	B9	纯电动公交车	54.4	100.0	100.0	100.0	18.8	200 000	100 kW·h	48 000	8
	B10	纯电动大客车	7.3	20	35	60	22.0	300 000	80 kW·h	40 000	15
	B11	纯电动小客车	6.5	30	65	100	44.2	100 000	15 kW·h	13 000	15
	B12	纯电动轻型货车	4.3	100	100	100	28.9	100 000	35 kW·h	70 000	15
	B13	纯电动重型货车	0	15	35	60	9.5	550 000	150 kW·h	100 000	15
氢燃料电池车	B14	氢燃料电池大客车	0.1	1	6	12	100.0	500 000	6 kg	40 000	15
	B15	氢燃料电池重型货车	0	1	6	12	100.0	500 000	7.5 kg	70 000	15
可替代燃料	B16	可持续航空燃料	0			65	60.0	5 000	0.27 kg	—	—

注: 1)燃油车电动化的节能减排率根据北京市电力碳排放因子0.604 kg·(kW·h)⁻¹计算。

耗热量指标能够降低 50%~55%。德国、波兰等国对供热计量系统改造前后热耗量进行调查比较,发现节能效率范围大致为 15%~32.5%^[40]。根据《超低能耗居住建筑设计标准》,超低能耗建筑是通过被动式设计最大程度上降低建筑供暖、室调制冷和照明需求,标准要求能效较现行标准降低 50%。超低能耗建筑的具体技术有高性能的节能门窗、提高建筑气密性的措施和带热回收新风系统的设置。目前来说,我国被动式低能耗建筑的平均增量成本约为 1 000~1 400 元·m⁻²^[41]。

建筑中照明能耗占电力消耗量的 20%~30%,减少照明能耗的节能减排潜力巨大。对于大厦照明、酒店照明、学校照明来说,选用高效节能光源和灯具,采用智能照明控制系统可以减少 20%~30% 的照明能耗^[42]。根据北京市《2019 年居民行为节能调查研究报告》,节能灯使用比例为 55.9%,LED 灯使用比例为 37.4%。照明节能措施中将 100% 使用 LED 灯,计算最大减排潜力。根据《北京市统计年鉴 2020》,至少有 97.4% 全市居民使用燃气灶具,且在单位食堂和酒店餐饮业中多数使用 LPG 或天然气作为燃料,用电用户不足 4%。目前,北京市由于做饭排放的 CO₂ 约为 1 000 万 t,节能燃气灶台和炊事电气化是实现零碳的最可行途径^[43]。

2015 年底,城镇居住建筑面积为 48 496 万 m²,北京

市公共建筑面积为 31 623 万 m²,农村居住建筑面积为 18 000 万 m²。其中,既有未节能居住建筑面积为 3 783 万 m²,也有未节能公共建筑面积 16 811 万 m²,各类型建筑节能改造技术推广率取 100%,热泵渗透率预测参考文献 [44]。各项技术的成本参考文献 [40, 45~47],具体数值如表 4 所示。

1.3 其他参数来源与设定

1.3.1 能源成本参数 能源成本是估算能源节省成本的主要影响因素。能源成本波动会导致边际减排成本呈现 40%~60% 的波动^[23]。研究中涉及煤炭、天然气、汽油、柴油、航空煤油、可持续航空燃料、氢能和电力的价格。随着时间变化,能源成本保持不变。

1.3.2 折现率参数选择 折现率用于将未来有限期预期收益折算成现值。根据投资的不同,折现率分为社会折现率和私人折现率。社会折现率被认为是无风险的,大致相当于经济稳定时期政府的借贷利率,一般为 5%~8%。相比之下,私人贴现率反映了面临投资时的投资者的机会成本和风险溢价考量,较高的折现率意味着假设项目预期收益将面临较大风险。为了方便对比分析,研究使用 5% 社会折现率进行将各年的现金流成本折现,以体现资金的时间价值,对低碳技术的投资成本在其投资回收期内进行折算。

表 4 建筑部门碳减排技术成本参数

部门	序号	减排措施	技术渗透率/%	增量成本	寿命/a	文献来源
城镇居住建筑	C1	住宅围护结构改造	100	140元·m ⁻²	20	[45]
	C2	供热计量系统改造	100	30元·m ⁻²	5	[40]
	C3	小型空气源热泵	30	120元·m ⁻²	15	[46]
	C4	集中式空气源热泵	10	63元·m ⁻²	15	[46]
	C5	地源热泵	10	95元·m ⁻²	15	
	C6	超低能耗居住建筑	10	1 175元·m ⁻²	20	[41]
	C7	节能燃气灶台	100	300元·户 ⁻¹	5	[47]
	C8	照明节能	100	820元·户 ⁻¹	5	
	C9	新一级能效空调	100	2 000元·户 ⁻¹	10	
公共建筑	D1	既有公共建筑节能改造	100	66元·m ⁻²	20	
	D2	空气源热泵	30	63元·m ⁻²	15	
	D3	地源热泵	30	95元·m ⁻²	15	
	D4	智能照明	100	1 500元·m ⁻²	10	
农村居住建筑	E1	既有农村建筑节能改造	100	125元·m ⁻²	20	
	E2	空气源热泵	30	220元·m ⁻²	15	

2 研究结果

2.1 电力部门边际减排成本分析 北京市电力部门减排技术在 2015—2050 年累计减排潜力为 14.96 亿 t, 平均边际减排成本为 154.56 元·t⁻¹。其中集中式光伏发电的边际减排成本最低, 比分布式光伏低 211.36 元·t⁻¹。这是因为集中式光伏的建设规模更大, 一般 >2 万 kW, 所以每 kW·h 电力价格中投资与运营成本相对较低。增加外调绿电规模的边际减排成本较低, 为 43.28 元·t⁻¹。实际上, 根据国际可再生能源署 (IRENA) 最新发布的《2020 年可再生能源发电成本》^[48] 显示, 大多数新建可再生能源的发电成本已经比最便宜的化石燃料发电成本要低^[49], 目前欧洲购买可再生能源发电的边际成本几乎为零^[50]。煤改燃气发电减排成本最高, 每减排 1 t CO₂, 花费 786.32 元, 这是因为天然气运输及燃料成本比煤炭价格高 2~3 倍(表 5)。

表 5 电力部门减排措施边际减排成本

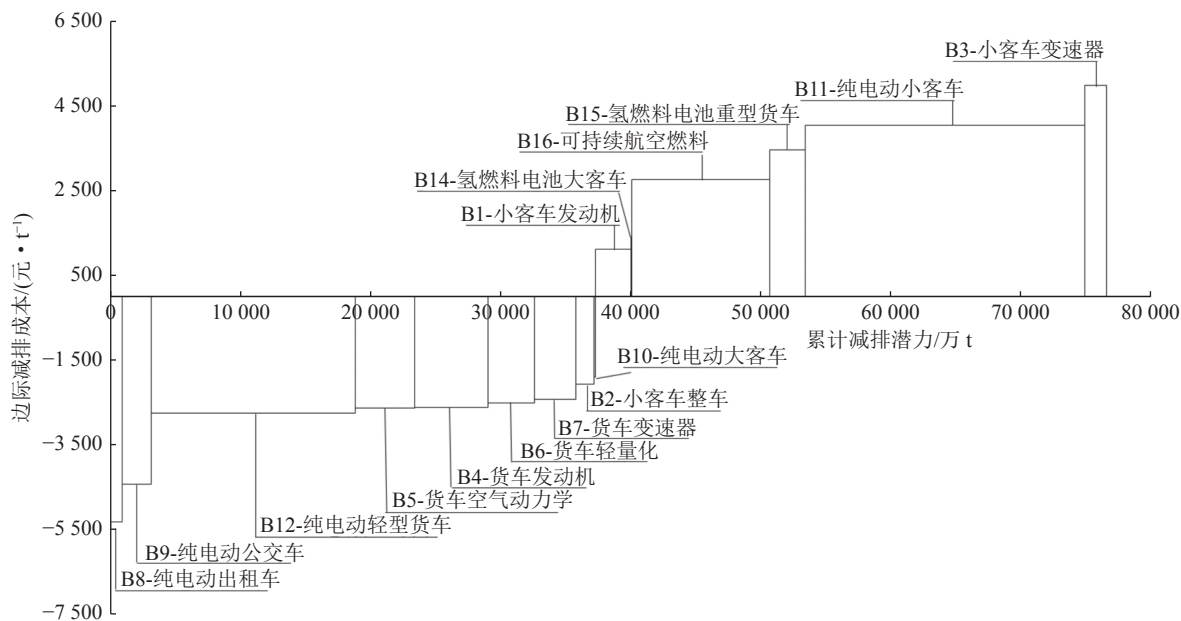
减排措施	碳减排潜力/万 t	边际减排成本/(元·t ⁻¹)
煤改气发电	2 147.21	786.32
集中式光伏	198.00	-986.36
分布式光伏	10 611.35	775.00
增加外调电力规模	136 606.63	43.28

减排潜力方面, 集中式光伏的减排潜力最低, 外调绿电的减排潜力最大。这是由于北京市土地资源紧缺, 不具备大规模光伏电站项目所需的土地条件。

在本研究情景设置中, 地面集中式光伏装机增长缓慢, 从 2015 年到 2050 年, 由 1.5 万 kW 增长至 15 万 kW, 累计减排潜力较低。而分布式光伏增长迅速, 在政策推动下, 装机迅速增加至 1 500 万 kW, 是本地可再生能源发电的主要来源。增加外调绿电的减排成本低, 且减排潜力最大。北京市“十四五”时期能源发展规划提出, 将显著提升区域绿电进京输送能力, 2025 年北京市外调绿电达到 300 亿 kW·h, 外调绿电将是今后北京市电力部门减排的主要贡献者。

2.2 交通部门边际减排成本分析 按照边际减排成本由小到大的顺序, 交通减排措施的边际减排成本曲线如图 1 所示。交通部门的 2015—2050 年的 CO₂ 累计减排潜力约为 7.66 亿 t。16 种减排技术的 CO₂ 减排成本从 -5 348.23 到 4 982.8 元·t⁻¹ 不等, 其中边际减排成本最低的为纯电动出租车, 成本最高的为小客车变速器。具有负减排成本的减排技术有 10 项, 可以达到 48.72% 的累计碳排放量。

在负减排成本技术中, 作为商业用途的纯电动出租车和纯电动公交车的减排成本是较低的 2 项, 但是其累计减排潜力较小, 分别为 949.92 万、2 232.00 万 t。电动轻型货车的减排潜力最大, 累计减排潜力达到 1.57 亿 t, 且减排成本也具有优势, 为 -2 766.81 元·t⁻¹。4 种货车的能源效率改善措施边际减排成本均为负值, 也具有相当的减排潜力(3 177 万~5 600 万 t)。相比之下, 汽油车的 3 项能效改善措施中, 只有对整车的节能减排技术是具有负减排成本的, 汽油车的发动

图 1 北京市交通部门边际 CO₂ 减排曲线

机和变速器的减排成本为正,不具有成本竞争力。

16 项减排技术中,减排潜力最大的措施是纯电动小客车,累计减排潜力为 2.15 亿 t。这是由于燃油汽车限购,纯电动小客车措施实施率在 2050 年预计达到 100%。减排措施执行越早,实施率越高,累计减排潜力越大。由于北京市电力排放因子较低,所以实际减排潜力更高。随着技术发展及规模化生产,电动汽车的成本将会急剧下降^[51],到 2025 年电池成本降为 550 元·(kW·h)⁻¹^[52],电动车售价与同配置的燃油车相比持平甚至更低^[53],2025 年后纯电动私人汽车的边际减排成本可能会变为负值。从单车而言,年均行驶距离长、百 km 油耗大的纯电动轻型货车的减排潜力也较大。

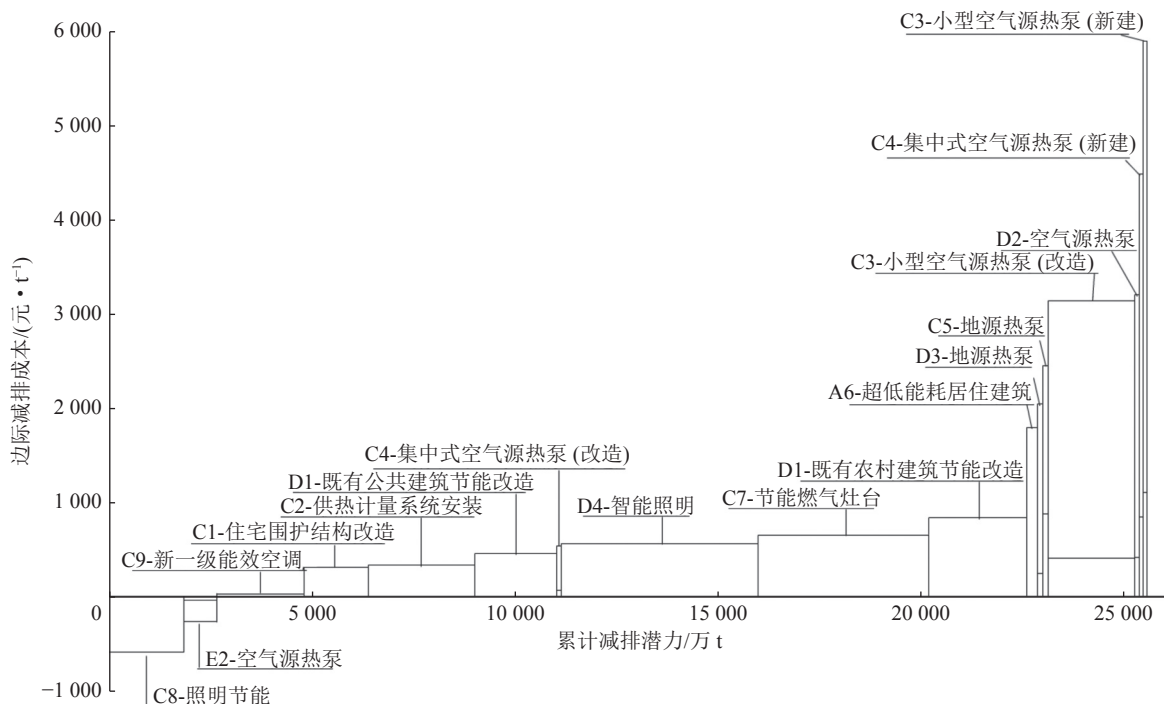
从成本效益的角度上,应该大力推广具有负边际减排成本的减排措施,尽快实现其全部减排潜力。根据实际推广效果而言,上述负成本措施在 2015—2022 年措施实施率均较高,如增加电动公交车及提升乘用车燃油限值标准等措施等已列入行业标准或规划,初步建立了良好政策推广机制。结合交通部门 MAC 曲线,应继续加大对纯电动轻型货车的减排技术的推广。

6 项正边际减排成本措施的 MAC 为 1404~4000 元·t⁻¹,累计减排潜力占 51.28%。正边际减排成本的减排措施仍然具有一定的市场障碍。为实现交通部门碳中和,需要更强力的政策才能使企业或个人接受新能源客货车,如提高购车补贴等。可持续航空燃料的减排潜力较大,能实现大幅度减排(1.06 亿 t),且随着技术的持续发展,其减排率将会进一步提高,但目前仍具有较大的成本优化空间。

2.3 建筑部门边际减排成本分析 北京市建筑部门减排技术的减排潜力和边际减排成本如图 2 所示,2015—2050 年的累计减排潜力约为 2.55 亿 t。15 种减排技术的 CO₂ 减排成本从 -590.91 到 5895.18 元·t⁻¹ 不等,其中具有负减排成本的减排技术仅有 2 项,分别为居住建筑照明节能、农村更换空气源热泵,其累计减排潜力分别为 1828.70 万和 812.72 万 t。

8 项减排技术的减排成本 < 1000 元·t⁻¹,新一级能效空调、智能照明及节能燃气灶台等此类节能器具的减排措施的累计减排潜力最大,且边际减排成本也具有优势。既有建筑(包括住宅、公共建筑和农村)改造措施的减排潜力次之,且边际减排成本较低。MACC 表明地热及热泵减排技术的边际减排成本最高。但随着绿电的应用,热泵的边际减排成本将不断下降至 < 1000 元·t⁻¹。考虑到被替换供暖系统的碳排放差异,农村空气源热泵的 MAC 最低,而在新建居住建筑中运用小型空气源热泵的 MAC 最高。除此之外,电力采暖效率将显著影响减排效益。相较于燃气供暖,推广低效的电力采暖措施将会增加碳排放,根据 2020 年北京市电力碳排放因子 0.604 kg·(kW·h)⁻¹,仅当电力采暖措施能效比(coefficient of performance, COP) ≥ 2.8 时,推广采暖电气化才能减少碳排放。

建筑部门减排技术普遍具有正边际减排成本,推广难度较高。这是由于北京持续多年大气治理工作极大地改善了建筑部门能源结构,如“燃气改电”“煤改电”等。大部分减排潜力集中在热泵供暖等电气化措施上,压减燃煤等负减排成本措施潜力较低。在提升建筑能效方面,北京既有建筑节能改造、建筑节能标

图2 北京市建筑部门边际CO₂减排曲线

准编制及更新工作均处于全国前列。“十三五”与“十四五”期间,北京市完成既有建筑节能改造累计8000万m²以上。2021年北京市新建居住建筑率先执行80%节能设计标准,不断提升对建筑物的围护结构保温、门窗热工等各项参数要求。相对于既有建筑节能改造,推广超低能耗建筑具有示范意义,但减排潜力较低、MAC较高。这是因为相对于现有节能设计标准而言,超低能耗建筑节能率≤15%,节能减排空间小。

对于高成本措施,北京市已经通过政府补贴等激励政策提高减排措施推广效果。目前,对于热泵、太阳能或其他可再生能源供暖,政府补贴可以覆盖大部分安装成本。例如,农村改用热泵供暖,最高可获得24000元补贴。仅从能源成本考虑,假设燃气锅炉效率为95%,天然气价2.5元·m⁻³,电价0.51元·(kW·h)⁻¹。燃气锅炉供暖的成本为67元·GJ⁻¹,地源热泵成本为47元·GJ⁻¹,空气源热泵成本为57元·GJ⁻¹。因此,热泵的运行成本低于燃气锅炉。此外,电价补贴与低谷电价等政策将进一步降低热泵取暖成本。这表明在合理的政府补贴模式下,热泵等高成本措施的经济阻碍将逐步降低。

2.4 边际减排成本敏感性分析 由图3可知,折现率对减排措施的减排潜力并无影响。边际减排成本对折现率很敏感,随着折现率的上升,减排措施的边际减排成本呈现上升趋势。折现率影响措施边际减排成本的正负,但对MAC曲线各措施顺序并无影响。当折现率从15%上升至30%,未来预期收益的现值降

低,当收益低于投资成本时,将不具有成本效益,电动大客车的边际减排成本由负变正。

3 讨论与政策建议

筛选出的电力部门、交通部门、建筑部门的减排技术,将在2015—2050年间分别带来累计减排潜力14.96亿、7.66亿、2.55亿t,平均碳边际减排成本为485.12元·t⁻¹。电力部门、交通部门、建筑部门的平均减排成本分别为154.56、417.56、688.28元·t⁻¹。随着电力碳排放因子的降低,交通与建筑部门中电力替代措施的减排量将不断增大。终端电气化措施与电力部门减排措施二者起到相互促进减排的作用。从减排潜力和减排成本来看,北京市应大力推广电力减排措施,保证碳排放进入快速下降通道。基于以上研究结果,绘制了北京市边际减排成本曲线与行动路线(图4),并提出如下政策建议。

1)对于增加外调绿电,减排潜力显著且边际减排成本十分低。北京市2015—2022年外调绿电量从45亿kW·h大幅增加至244.7亿kW·h,但本文在估算时仅考虑了绿电相对于火电的绿色溢价。实际上,城市需要结合电力基础设施建设,提升电网的灵活性和稳定性,以应对大规模可再生能源并网与消纳所带来的风险,达到快速减排的目的。

2)从减排潜力来看,新能源汽车是推广减排潜力最大的措施之一。虽然其边际减排成本较高,但是成本仅是影响因素之一,建议通过加强充换电、加氢等配

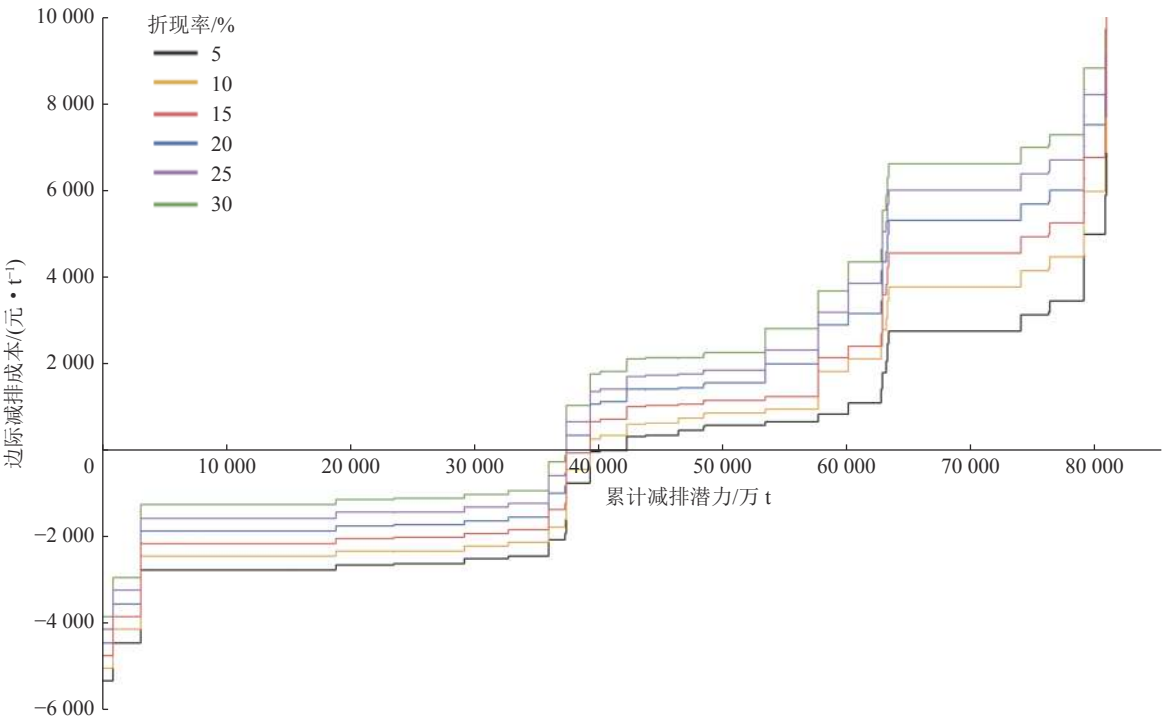


图 3 不同折现率下北京市减排措施边际减排成本曲线

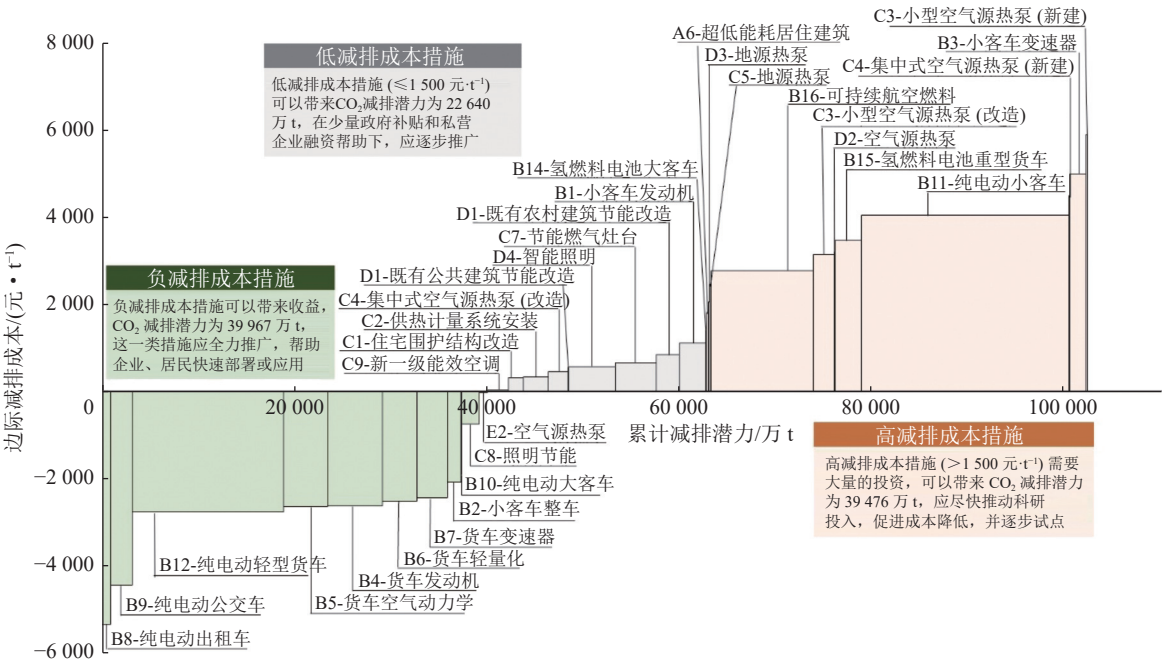


图 4 北京市边际减排成本曲线与行动路线

套基础设施建设,通过政策降低汽车电池退化等技术因素造成的额外费用,进一步促进新能源汽车推广。

3)对目前中国城市而言,既有建筑节能改造的减排潜力非常高。北京市已提出全面实施新建居住建筑第 5 步节能设计标准,居住建筑节能率由 75% 提升至 >80%。但节能改造的减排潜力不应仅依赖“一次性”的工程,应加强对建筑节能的管理,增加相应能耗管控岗位,将进一步增加建筑部门的减排效益。

4)折现率敏感性分析表明,在进行边际减排成本计算时,考虑不同措施面向的对象,使用不同的贴现率会更符合实际。这是因为投资不确定性对个人或中小型投资者影响更严重,如卡车司机等。新兴技术所带来的投资风险,很可能使他们无法按照预期回收收益,所以,较高的折现率也会正确反映此类对象的心理。因此,为促进减排技术的推广,政府可以采取一定程度的激励政策,确保此类减排投资收益的稳定

性,降低减排投资风险。

4 结论

城市是CO₂的主要排放源,也是碳中和的主阵地和治理抓手,对于实现国家碳中和至关重要。本研究使用“基于专家”的边际减排成本法,选取北京为案例进行研究,从电力、交通、建筑部门筛选了35项减排措施,估算2015—2050年减排措施带来的减排潜力和边际减排成本,构建了北京市边际减排成本曲线,主要结论如下。

1)北京市碳中和措施的边际减排成本为-5348.23~5895.18元·t⁻¹。筛选出的电力部门、交通部门、建筑部门减排技术的减排潜力分别为14.96亿、7.66亿、2.55亿t。平均碳边际减排成本为485.12元·t⁻¹。电力、交通、建筑部门的平均减排成本分别为154.56、417.56、688.28元·t⁻¹。北京市应大力推广电力减排措施,保证其碳排放进入快速下降通道。

3)在35项减排措施中,11项的减排措施的边际减排成本为负,成本有效的CO₂减排潜力为39967万t,占39.15%。应对负成本措施政策进行全力推广,包括电动出租车、电动公交车和电动轻型货车、照明节能等。

4)高边际减排成本措施(>1500元·t⁻¹)占28.57%,其减排潜力占38.67%。如电动私人小客车、氢燃料电池重型货车等,是推广低碳技术的重点领域。应加大对这类措施的技术研发投入,并且解决相应基础设施短缺等阻碍,逐步试点并降低成本。

本研究仍存在一些不足:1)由于数据问题,缺少对电动车、氢燃料电池车能效提升措施的考虑;2)未能考虑到规模效应对技术成本的影响,还需结合未来技术发展,分析技术边际减排成本的动态变化;3)缺少对居民行为转变及技术推广的管理障碍与其他成本的考虑。未来的研究中,可以根据碳中和城市发展特点对减排技术进行更新,进而对城市碳中和措施的边际减排成本进行更加深入的分析。

5 参考文献

- [1] MORRIS J, PALTSEV S, REILLY J. Marginal abatement costs and marginal welfare costs for greenhouse gas emissions reductions: results from the EPPA model[J]. *Environmental Modeling & Assessment*, 2012, 17(4): 325
- [2] McKinsey Company. Pathways to a low-carbon economy: version 2 of the global greenhouse gas abatement cost curve[R/OL]. 2013[2022-05-13]. <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/pathways-to-a-low-carbon-economy>
- [3] McKinsey Company. Greenhouse gas abatement cost curves [EB/OL]. 2010 [2022-05-13]. <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/greenhouse-gas-abatement-cost-curves>
- [4] KLEPPER G, PETERSON S. Marginal abatement cost curves in general equilibrium: the influence of world energy prices[J]. *Resource and Energy Economics*, 2006, 28(1): 1
- [5] CHEN W. The costs of mitigating carbon emissions in China: findings from China MARKAL-MACRO modeling[J]. *Energy Policy*, 2005, 33(7): 885
- [6] JIANG H D, PUROHIT P, LIANG Q M, et al. The cost-benefit comparisons of China's and India's NDCs based on carbon marginal abatement cost curves[J]. *Energy Economics*, 2022, 109: 105946
- [7] 吴力波, 钱浩祺, 汤维祺. 基于动态边际减排成本模拟的碳排放权交易与碳税选择机制[J]. *经济研究*, 2014, 49(9): 48
- [8] 姚云飞, 梁巧梅, 魏一鸣. 国际能源价格波动对中国边际减排成本的影响: 基于CEEPA模型的分析[J]. *中国软科学*, 2012(2): 156
- [9] MARKLUND P O, SAMAKOVLIS E. What is driving the EU burden-sharing agreement: efficiency or equity?[J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(2): 317
- [10] 刘明磊, 朱磊, 范英. 我国省级碳排放绩效评价及边际减排成本估计: 基于非参数距离函数方法[J]. *中国软科学*, 2011(3): 106
- [11] 陈德湖, 潘英超, 武春友. 中国二氧化碳的边际减排成本与区域差异研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(10): 86
- [12] 魏楚. 中国城市CO₂边际减排成本及其影响因素[J]. *世界经济*, 2014, 37(7): 115
- [13] CHENG J, XU L, WANG H, et al. How does the marginal abatement cost of CO₂ emissions evolve in Chinese cities? An analysis from the perspective of urban agglomerations[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, 32: 147
- [14] XIAN Y, WANG K, WEI Y M, et al. Opportunity and marginal abatement cost savings from China's pilot carbon emissions permit trading system: simulating evidence from the industrial sectors[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 271: 110975
- [15] 吴贤荣. 中国农业碳排放边际减排成本: 参数法测度与时空分析[J]. *世界农业*, 2021(1): 46
- [16] KESICKI F. Marginal abatement cost curves: combining energy system modelling and decomposition analysis[J]. *Environmental Modeling & Assessment*, 2013, 18(1): 27
- [17] PENG B B, XU J H, FAN Y. Modeling uncertainty in estimation of carbon dioxide abatement costs of energy-saving technologies for passenger cars in China[J]. *Energy*

- Policy, 2018, 113: 306
- [18] HUANG Y H, WU J H. Bottom-up analysis of energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction potentials in the cement industry for energy transition: an application of extended marginal abatement cost curves[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 296: 126619
- [19] AMINETZAH D, DENIS N, HENDERSON K, et al. Agriculture and climate change reducing emissions through improved farming practices[R/OL]. 2020 [2022-05-13]. <https://www.mckinsey.com/industries/agriculture/our-insights/reducing-agriculture-emissions-through-improved-farming-practices>
- [20] 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
- [21] MUANGJAI P, WONGSAPI W, BUNCHUAIDEE R, et al. Estimation of marginal abatement subsidization cost of renewable energy for power generation in Thailand[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 528
- [22] AGUILAR M, SZKLO A, BRANCO D C. Implementation of Maritime Transport Mitigation Measures according to their marginal abatement costs and their mitigation potentials[J]. *Energy Policy*, 2022, 160: 112699
- [23] SCHÄFER A W, EVANS A D, REYNOLDS T G, et al. Costs of mitigating CO₂ emissions from passenger aircraft[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(4): 412
- [24] 周丽, 陈文颖. 建筑部门典型节能减排技术的成本效益分析[J]. *生态经济*, 2015, 31(8): 4
- [25] IEA. Projected costs of generating electricity 2020[R/OL]. 2020 [2022-05-13]. <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>
- [26] International Renewable Energy Agency. Renewable power generation costs in 2019[R/OL]. 2020 [2022-05-13]. <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019>
- [27] 赵长红, 张浩楠, 张兴平, 等. 集中式天然气发电项目经济性研究[J]. *国际石油经济*, 2016, 24(12): 57
- [28] JOSHI S, MITTAL S, HOLLOWAY P, et al. High resolution global spatiotemporal assessment of rooftop solar photovoltaics potential for renewable electricity generation[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 5738
- [29] 董梓童, 姚金楠. 绿电开市! 首批交易电量近80亿千瓦时[N/OL]. 中国能源报. (2021-09-08)[2022-05-13]. http://www.cnenergynews.cn/dianli/2021/09/08/detail_20210908106012.html
- [30] 国家能源局. 2020年度全国可再生能源电力发展监测评价报告[EB/OL]. (2021-06-20)[2022-05-13]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-06/20/c_1310039970.htm
- [31] 国务院办公厅关于印发新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)的通知[A/OL]. (2020-11-02)[2022-10-07]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2020-11/02/content_5556716.htm
- [32] 交通运输部 国家铁路局 中国民用航空局 国家邮政局贯彻落实《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》的实施意见[A/OL]. (2022-06-24)[2022-10-07]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202206/t20220624_3659984.html
- [33] 北京市交通发展研究院. 2021年北京市交通发展年度报告[R/OL]. 2021[2022-05-13]. <https://www.bjtrc.org.cn/List/index/cid/7.html>
- [34] 交通运输部. 交通运输部关于发布交通运输行业重点节能低碳技术推广目录(2021年度)的公告[EB/OL]. (2021-11-30)[2022-05-13]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202201/t20220121_3637580.html
- [35] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图 2.0[EB/OL]. 2020[2022-05-13]. https://www.sohu.com/a/428528554_362550
- [36] New York City Mayor's Office of Sustainability, Con-Edison, et al. Pathways to carbon-neutral NYC: modernize, reimagine, reach[R/OL]. 2021[2022-05-13]. <https://www.nyc.gov/assets/sustainability/downloads/pdf/publications/Carbon-Neutral-NYC.pdf>
- [37] FERNANDA ROJAS MICHAGA M, MICHAÏLOS S, AKRAM M, et al. Bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) potential in jet fuel production from forestry residues: a combined techno-economic and life cycle assessment approach[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 255: 115346
- [38] 彭彬彬. 乘用车部门节能和碳减排潜力: 基于技术和成本的视角[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017
- [39] 夏楚瑜, 马冬, 蔡博峰, 等. 中国道路交通部门减排技术及成本研究[J]. *环境工程*, 2021, 39(10): 50
- [40] 罗雪莹. 分户计量供暖系统的研究与应用[D]. 北京: 北京建筑工程学院, 2011
- [41] 住房和城乡建设部科技与产业化发展中心. 中国被动式低能耗建筑年度发展研究报告[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017
- [42] 任红. 建筑电气设计中的节能措施[J]. *建筑电气*, 2008, 2: 8
- [43] 江亿, 胡珊. 中国建筑部门实现碳中和的路径[J]. *暖通空调*, 2021, 5(51): 1
- [44] DEETJEN T A, WALSH L, VAISHNAV P. US residential heat pumps: the private economic potential and its emissions, health, and grid impacts[J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(8): 084024
- [45] 陈红兵, 刘玲玲, 李德英. 北京地区既有住宅建筑节能改

- 造与分析[C]//既有建筑综合改造关键技术与示范项目交流会论文集. 北京: 中国建筑科学研究院, 2011: 152
- [46] 江亿. 华北地区大中型城市供暖方式分析[J]. 暖通空调, 2000, 30(4): 30
- [47] 杨璐, 杨秀, 刘惠, 等. 中国建筑部门二氧化碳减排技术及成本研究[J]. 环境工程, 2021, 39(10): 41
- [48] International Renewable Energy Agency. Renewable power generation costs in 2020[R/OL]. 2021[2022-05-13]. <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020>
- [49] 秦炎. 市场机制, 欧洲可再生能源大发展的关键[J/OL]. 财经杂志. (2021-02-01)[2022-03-24]. <https://finance.sina.com.cn/chanjing/cyxw/2021-02-02/doc-ikftssap2492488.shtml>
- [50] NYKVIST B, NILSSON M. Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles[J]. Nature Climate Change, 2015, 5(4): 329
- [51] 国务院发展研究中心产业经济研究部. 节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020年) [EB/OL]. (2012-06-28) [2022-10-07]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2012/content_2182749.htm
- [52] BloombergNEF. BloombergNEF's annual battery price survey finds prices fell 6% from 2020 to 2021[EB/OL]. (2021-11-30)[2022-05-13]. <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-to-an-average-of-132-kwh-but-rising-commodity-prices-start-to-bite/>

Marginal abatement cost analysis of urban carbon neutralization measures: taking Beijing as a case

LIU Gengyuan^{1,2)} GUO Lisi¹⁾ CHEN Yu¹⁾ YAN Ningyu¹⁾ MENG Fanxin¹⁾
LI Hui¹⁾ CHEN Caocao³⁾ XIE Tao⁴⁾

(1) State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China; 2) Beijing Engineering Research Center for Watershed Environmental Restoration & Integrated Ecological Regulation, 100875, Beijing, China; 3) Beijing Climate Change Management Centre, 100045, Beijing, China; 4) Beijing SDL Technology Co, Ltd, 102206, Beijing, China)

Abstract Cities are the main site to achieve carbon neutrality. Under the carbon neutrality target, more emission reduction technologies and policies will be encouraged, to play a role in the low carbon transformation of cities. In this study the marginal abatement cost method is used to analyze the abatement potential and cost of specific abatement technologies in the context of low-carbon measures promotion in Beijing. The marginal abatement cost curve for Beijing with 35 abatement measures is drawn, and priority abatement measures with high economic efficiency are identified. This study also provides a prioritization of technology measures and implementation paths for Beijing to achieve the goal of carbon neutrality. This study shows the following 3 points. 1) The screening of emission reduction technologies for the power sector, transportation sector, and building sector reveals an emission reduction potential of 1 496 million tons, 766 million tons, and 255 million tons, respectively. The average marginal carbon abatement cost is 485.12 yuan · t⁻¹, and the average abatement costs of the power sector, transportation sector and construction sector are 154.56, 417.56 and 688.28 yuan · t⁻¹ respectively. Power abatement measures should be promoted in Beijing to ensure that Beijing's carbon emissions enter a phase of rapid decline. 2) Among the 35 emission reduction measures, the marginal abatement cost of 11 of them is negative; the cost-effective abatement potential is 399.67 million t CO₂, accounting for 39.15%. Negative cost measures such as electric cabs, electric buses and electric light trucks, and lighting energy efficiency should be vigorously promoted at the early stage of emission reduction. 3) High marginal abatement cost measures have high abatement potential, but the implementation is difficult due to cost barriers. To promote the proliferation of such abatement technologies, the government can adopt a certain degree of subsidies or incentive policies to ensure the stability of abatement investment returns and to reduce the risk of abatement investment.

Keywords carbon neutrality measures; marginal abatement costs; power sector; transportation sector; building sector

【责任编辑: 武 佳】