

引用格式: 郑玉华, 贾艺伟. 京津冀地区城市客运交通碳减排政策的成本效益分析[J]. 资源科学, 2022, 44(9): 1772-1784.
[Zheng Y H, Jia Y W. Cost-benefit analysis of carbon emission mitigation policies for urban passenger transport in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Resources Science, 2022, 44(9): 1772-1784.] DOI: 10.18402/resci.2022.09.03

京津冀地区城市客运交通碳减排政策的成本效益分析

郑玉华¹, 贾艺伟^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京)经济管理学院, 北京 102249;

2. 山东电力工程咨询院有限公司, 济南 250013)

摘要: 客运交通在京津冀地区城市交通总量中占比高, 其减排潜力是影响交通碳达峰的关键因素。本文建立了基于 Agent 建模与仿真方法的京津冀地区城市客运交通系统的模型, 模拟了京津冀地区不同城市客运交通碳减排政策情景下消费者的交通出行行为, 评估了各类碳减排政策的环境效益、经济成本及其对碳达峰的影响。结果显示: ①乘用车燃料效能提升政策是唯一可以在 2030 年京津冀三地同时实现城市客运交通碳排放达峰的政策情景, 且其碳减排的经济成本较低, 其中天津市预计最先实现碳排放达峰, 北京市次之, 河北省最后; ②公共交通推广政策的碳减排经济成本相对较高, 尤其以河北省最为突出, 虽然该政策可以在北京市和河北省实现城市客运交通碳排放达峰, 但无法实现天津市碳排放达峰目标; ③交通拥堵收费政策在京津冀三地单独实施无法实现碳排放达峰目标, 需要与其他政策组合实施。基于此, 京津冀三地实现客运交通碳排放达峰目标需要持续推进乘用车燃料效能的提升, 此外还可以采取新能源汽车补贴、公共交通推广和交通拥堵收费等组合政策, 以降低减排的经济成本。

关键词: 城市交通; 碳减排成本效益; 自主体模拟; 交通碳排放; 情景分析; 京津冀地区

DOI: 10.18402/resci.2022.09.03

1 引言

增强环渤海及京津冀协同发展是中国的重大发展战略之一, 习近平总书记指出京津冀协同发展要交通先行, 其核心内容是把交通和生态环保作为京津冀协同发展的领先领域。京津冀地区是中国重要的经济文化中心之一, 2019 年总人口 9952.6 万人, 占全国总人口的 7.1%, 生产总值 84479.3 亿元, 占全国生产总值的 8.6%, 经济、人口体量大, 也是大气环境治理的重点区域。随着社会经济的发展, 京津冀地区民用汽车拥有量从 2009 年的 893.9 万辆增加至 2019 年的 2547.1 万辆, 机动车数量的大幅增长加剧了该地区交通碳排放问题^[1], 京津冀地区实现交通“碳达峰”“碳中和”的目标面临艰巨的挑战。在交通运输能耗和碳排放总量中, 城市客运交通占

比较高^[2], 针对城市客运交通进行碳减排政策研究是实现绿色交通的重要途径之一。由于京津冀地区的城市发展处于不同阶段, 城市客运交通结构和消费者的交通需求有鲜明的差异, 因此有必要针对消费者的异质性特点构建京津冀城市客运交通模拟系统, 据此对各种碳减排政策的经济成本和减排效果进行综合评价, 从而探索在政策干预下实现京津冀地区客运交通碳排放达峰的途径。

2 文献回顾

碳达峰实现路径及其干预政策研究一直是气候变化经济学的研究热点^[3]。对于客运交通领域, 由于参与市场的消费者和企业众多, 行为机制复杂, 需要政府采取政策引导或限制消费者和企业的行为, 以通过碳减排实现客运交通碳达峰。从研究

收稿日期: 2022-03-07, 修订日期: 2022-07-19

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(21ZDA030)。

作者简介: 郑玉华, 女, 河北承德人, 教授, 主要研究方向为资源与环境管理, 能源经济与政策。E-mail: cupbazyh@163.com

2022年9月

内容看,客运交通领域促进碳减排的政策,目前主要包括4类:

第Ⅰ类为技术进步类政策,具体包括提高车辆燃料利用效率或使用替代能源等。王勇等^[4]的研究发现技术突破对不同运输方的碳减排效果最为显著;Ren等^[5]、Ahmadi^[6]和刘固望等^[7]的研究结果均表明当电动汽车替代燃油车时,具有显著的碳减排效果,但任梦磊等^[8]认为电动汽车的碳减排效果受区域能源结构和气候因素的影响较大。

第Ⅱ类为扩大公路通行能力减少拥堵类政策。Nugmanova等^[9]、Lee^[10]认为政府通过新建公路来缓解拥堵并实现减少碳排放的措施可能在短期内有效,然而随着时间推移,新建公路会引导更多车辆上路,该政策对出行者的诱导效应会严重侵蚀高速公路通行能力扩容所带来的减排效益,从而导致政策失效。有学者提出,建立智能交通系统对解决公路层面拥堵问题具有较大的潜力^[11,12],但智能交通系统数据共享过程存在一定的协调难度和隐私泄露风险^[11,13],也需要相关的技术支持和政策规制。此外,部分学者运用包括GPS和交通卡记录等交通大数据,通过研究浪费性通勤(Excess Commuting)来对区域交通出行进行优化^[14-16],并研究与之适配的减少城市交通拥堵和优化出行的政策^[17]。

第Ⅲ类为发展公共交通替代私人交通类政策。张清等^[18]和王白雪等^[19]分别通过对上海市和北京市不同客运方式碳排放的比较分析,发现轨道交通是单位周转量碳排放最低的客运交通方式,出租车是单位周转量碳排放最高的出行方式。Zhang等^[20]认为通过增加公共交通的比例来实现上海市交通减排目标更为有效,其中轨道交通将成为公共交通的主要方式;Zhang等^[21]对上海市最佳城市交通结构的研究认为,以轨道交通为主要出行方式,大幅度减少私家车出行比例,将公交车的比例保持现状的交通出行结构最为合理。

第Ⅳ类为通过经济措施(如拥堵收费等)或监管措施(如单双号限行等)降低交通出行需求类政策。与前3类政策较长的实施周期不同,这类政策可以在短期内减少排放和改善空气质量^[22],徐墨等^[23]认为实施拥堵收费的前提是城市拥有发达的公共交通系统,从而有益于时间价值较高的出行者和时间价值较低的出行者同时改善福利,而对于时间价

值介于二者之间的出行者则不确定。邵丹娜等^[24]使用意愿价值法评估了杭州地区消费者对征收拥堵费的意愿和心理价格,发现家庭月收入对于征收意愿和心理价格有明显的影响;杨浩雄等^[25]则发现北京交通拥堵费仅可能对中、低收入群体有效,对高收入群体几乎没有影响。对于以单双号限行为代表的监管措施,曹静等^[26]认为机动车限行政策并不能有效改善空气质量,但Chen等^[27]和孙传旺等^[28]的研究结果则认为限行政策可以有效地实现碳减排。自2019年新冠疫情爆发以来,许多国家和地区相继采取了封闭或隔离措施,虽然这并非是针对交通碳减排制定的政策,但是实际上大幅降低了交通出行和燃料消费^[29,30],也对道路交通污染物排放起到了抑制作用^[31-33],且在一定程度上影响了消费者的出行行为^[30]。

综合上述研究发现,车辆燃料利用效率提升、使用替代能源和发展公共交通具有显著的碳减排效果;扩大公路通行能力会在短时间内产生一定减排效果,但其对出行者的诱导效应可能会使出行需求增加从而导致政策失效;受限于不同地区经济社会发展水平以及历史交通结构等因素,经济措施或监管措施的碳减排效果在不同地区、不同人群之间存在较大差异^[34-36]。同时,对各类碳减排政策的经济成本分析也在逐渐引起关注,因为碳减排政策的经济成本也可能成为其实施的障碍。Li等^[37]和Zhao等^[38]研究了中国客运交通部门的碳达峰途径,结果发现转向替代性清洁能源并提高车辆燃料利用效率可能会在2030年之前使中国城市客运部门的碳排放达到峰值,且成本相对较低;Lopez等^[39]基于生命周期评价,发现电动汽车和燃料电池汽车的社会效益至少比燃油汽车高3倍,但是其高昂的使用成本成为推广使用的阻碍;推广公共交通代替私人交通,使用轨道交通代替道路交通时,公共交通的建设成本甚至可能会高于其减排效益^[40,41]。因此,对碳减排经济成本分析也应该是评价碳减排政策效果的重要依据。

京津冀地区城市发展的差异性决定了其客运交通具有复杂系统的特征,针对政府制定的碳减排政策,不同参与主体的反应具有较大差异,主体之间也互相影响,系统的运行是多个主体出行行为选择的结果,从而会使碳减排政策的效果具有不确定

性。京津冀客运交通的参与主体有哪些差异化的交通选择行为? 这些行为在不同的交通减排政策下会对客运交通结构和碳排放产生什么影响? 京津冀地区该如何低成本地实现碳达峰目标? 本文基于复杂适应系统理论, 构建基于自主体(Agent)建模与模拟方法的京津冀城市(包含北京市、天津市和河北省县级及以上城市)客运交通系统, 据此综合分析了各种客运交通减排政策的环境效益和经济成本, 为京津冀城市客运交通实现“碳达峰”相关干预政策的制定提供科学依据。

3 研究方法 with 数据

3.1 基于 Agent 的京津冀城市客运交通系统

系统旨在模拟京津冀三地不同交通减排政策情景下, 未来各类出行方式所占份额的变化, 分析各碳减排政策的经济成本, 并评估其环境效益。该系统具有复杂适应系统特征, 主要参与者包括政府、消费者和乘用车生产和进口企业 3 类 Agent 主体, 核心是模拟不同碳减排政策下消费者出行方式选择、政府对环境效益和经济成本的核算以及乘用车生产和进口企业的生产行为, 该系统模型如图 1 所示。

(1) 政府 Agent

系统中存在一个政府 Agent, 政府以一年为周

期发布和调整政策。政府 Agent 有两个主要职能: ①负责制定碳减排政策, 并将政策传递给消费者和企业, 具体包括行政命令、技术进步、经济激励和公共交通推广 4 类政策。一方面, 行政命令政策向消费者发布后将直接影响部分消费者出行方式的选择, 另一方面, 行政命令和经济激励政策相结合将影响乘用车生产和进口企业的生产和定价, 从而影响消费者选择各种交通方式的出行成本, 实现调控出行结构的目的。②对消费者出行产生的碳排放量和碳减排政策的经济成本进行核算。在系统中, 城市客运交通碳排放总量由公共交通碳排放量和私人交通碳排放量两部分构成。公共交通出行方式包括公交车和轨道交通两种, 私人交通出行方式包括燃油车以及纯电动车两种。

(2) 企业 Agent(中介 Agent)

系统中存在一个乘用车生产和进口企业 Agent, 作为政府政策传递给消费者的中介, 该企业 Agent 受到政府政策的影响, 通过科技进步和研发, 调整市场上出售乘用车的能源利用效率, 降低新能源汽车的生产成本等, 并负责将政府的行政命令转化为经济信号传达给消费者。企业相较于政府有更敏锐的反应, 因此模型中企业 Agent 每半年根据市场情况调整一次生产决策。

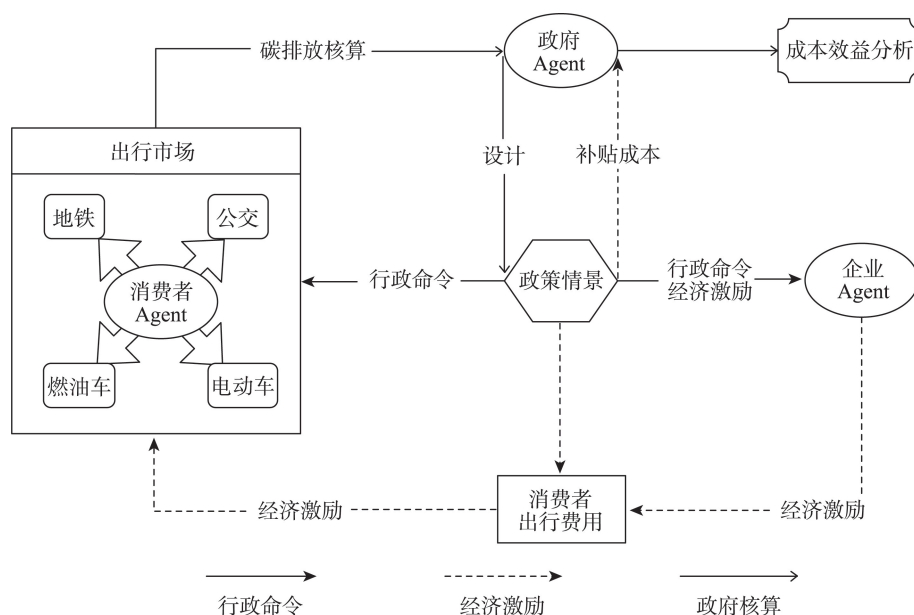


图1 系统模型

Figure 1 Framework of the system

2022年9月

(3) 消费者 Agent

系统中存在多个消费者 Agent, 其行为选择是模型运行的核心。消费者 Agent 是理性的, 在进行出行行为选择时倾向于选择成本最低的出行方式; 同时消费者 Agent 又是异质的, 系统内按收入水平划分为高、中、低 3 类 Agent。不同类消费者 Agent 在选择出行方式时具有不同的时间成本, 此外, 不同交通出行方式带来的舒适度不同, 同样影响消费者对其出行行为的选择。消费者 Agent 出行方式选择流程如图 2 所示, 消费者在系统中将根据出行综合成本选择出行方式, 如果其综合成本最低的出行方式没有达到承载力上限, 则选择其综合成本最低的出行方式, 否则, 将在剩余的出行方式中按综合成本最低原则重新选择。

3.2 碳减排政策的经济成本和环境效益核算方法

3.2.1 政府 Agent 对碳排放量和碳减排经济成本的核算

政府 Agent 承担两方面核算, 一是核算相关政策的环境效益, 即京津冀地区城市客运交通碳减排量; 二是核算相关政策的碳减排经济成本, 包括碳减排总经济成本和单位碳减排经济成本。

(1) 城市客运交通碳排放量核算。系统中城市客运交通碳排放包含轨道交通、公交车、出租车和私家车的碳排放量, 计算方法如下:

$$CE^k = \beta^k \times PT^k \times ED^k \times 10 \quad (1)$$

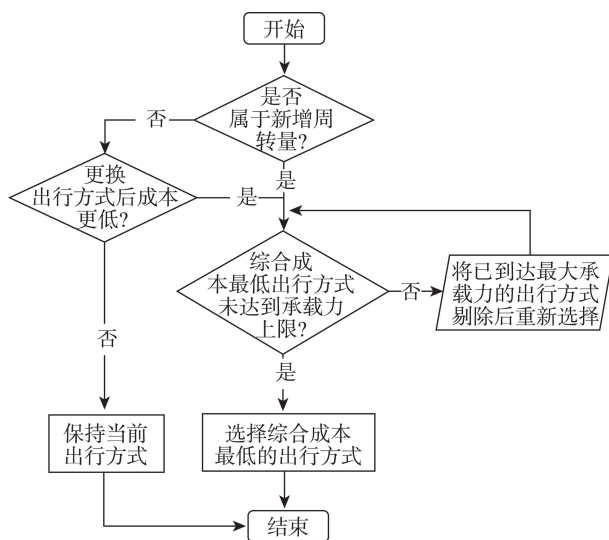


图2 消费者 Agent 出行方式选择流程

Figure 2 Travel mode selection process of consumer agent

$$PT^b = Trip^b \times DIS^b \quad (2)$$

$$PT^c = O^c \times DIS^c \times PC^c \times NUM^c \quad (3)$$

式中: CE^k 为第 k 种出行方式的碳排放总量, 单位: 万 t; β^k 为第 k 种出行方式消耗燃料的碳排放因子, 单位: kgCO_2/L (汽柴油) 或 $\text{kgCO}_2/(\text{kW} \cdot \text{h})$ (电能) 或 kgCO_2/m^3 (压缩天然气); PT^k 为第 k 种出行方式承担的客运周转量, $k=b$ 表示公共交通, $k=c$ 表示出租车或私家车, 单位: 亿人 km; ED^k 为该出行方式的能量强度, 单位: $\text{L}/\text{人 km}$ 或 $(\text{kW} \cdot \text{h})/\text{人 km}$ 或 $\text{m}^3/\text{人 km}$; PT^b 是公共交通年客运周转量, 单位: 亿人 km/y; $Trip^b$ 是公共交通年客运量, 单位: 亿人次/y; DIS^b 是公共交通旅客平均运输距离, 单位: km; PT^c 是出租车/私家车年客运周转量, 单位: 亿人 km/y; O^c 是出租车/私家车保有量, 单位: 亿辆; DIS^c 是出租车/私家车每次出行平均运输距离, 单位: km; PC^c 是每辆出租车/私家车平均载客量, 单位: 人; NUM^c 是每辆出租车/私家车年平均出行次数, 单位: 次/y。

(2) 城市客运交通碳减排经济成本核算。政府 Agent 制定的碳减排政策在实施过程中, 支出的总经济成本包括新能源汽车购置补贴、充电价格补贴以及轨道建设成本, 各政策经济成本计算方法见公式 (4)–(6), 此外, 在征收拥堵费的情景中, 还会产生拥堵费征收收益, 计算方法见公式 (7)。

$$C_1 = I_1 \times A_1 / 10^4 \quad (4)$$

$$C_2 = I_2 \times A_2 \times DIS^c \times ED^c / 10^8 \quad (5)$$

$$C_3 = UC \times L \quad (6)$$

$$Reve = ConRev \times NFuel \times 208 / 10^8 \quad (7)$$

式中: C_1 为新能源汽车购置补贴总额, 单位: 亿元; I_1 为每辆新能源汽车补贴金额, 单位: 万元; A_1 是新增的新能源汽车数量, 单位: 辆; C_2 为新能源汽车充电价格补贴, 单位: 亿元; I_2 为每度电补贴额度, 单位: 元/kWh; A_2 为接受补贴的新能源汽车数量, 单位: 辆; DIS^c 为私家车年平均行驶里程, 单位: 百 km; ED^c 为新能源汽车耗电量, 单位: $(\text{kW} \cdot \text{h})/\text{百 km}$; C_3 为轨道交通建设成本, 单位: 亿元; UC 为单位公里轨道交通造价, 单位: 亿元/km; L 是轨道交通新增里程, 单位: km; $Reve$ 为对燃油车征收拥堵费的总收入, 单位: 亿元; $ConRev$ 是对单车每天征收的拥堵费, 单位: 元/d; $NFuel$ 是燃油车数量, 单位: 辆, 由于机动车尾号限行以及仅在工作日征收拥堵费, 按照 1 年 52 周, 则共有 208 天征收拥堵费。

碳减排总经济成本和单位碳减排经济成本可由公式(8)、(9)计算得出。

$$TC_i = \sum_{n=1}^3 C_{in} - \sum_{n=1}^3 C_{in}^0 \quad (8)$$

$$AC_i = \frac{TC_i}{Q_i} \quad (9)$$

式中: TC_i 为政策 i 的总经济成本, 单位: 万元; $\sum_{n=1}^3 C_{in}$ 是政策 i 的各项经济成本之和, 单位: 万元; $\sum_{n=1}^3 C_{in}^0$ 为基准情景中的政策经济成本之和, 单位: 万元; AC_i 为政策 i 的单位碳减排经济成本, 单位: 万元/万 t; Q_i 为政策 i 相对于基准情景的碳减排量, 单位: 万 t。

3.2.2 消费者 Agent 的出行成本核算

消费者 Agent 的出行成本由时间成本、舒适度成本和出行费用三部分构成, 计算公式如下:

$$TravCost_{kj} = \alpha Time_{kj} + \beta Comfort_{kj} + \gamma Expen_{kj} \quad (10)$$

式中: $TravCost_{kj}$ 为收入水平为 j 的消费者选择 k 种出行方式的总成本, 单位: 元/y; $Time_{kj}$ 为消费者的时间成本, 单位: 元/y; $Comfort_{kj}$ 为消费者的舒适度成本, 单位: 元/y; $Expen_{kj}$ 为消费者的出行费用支出, 单位: 元/y; α 、 β 、 γ 为 3 种出行成本的权重系数, 本文参考刘永^[42]和张卫华等^[43]使用的参数均值, 取值分别为 0.5、0.2 和 0.3。

(1) 消费者的时间成本。时间成本是消费者出行的机会成本, 即将时间用于出行而非从事工作所放弃的收入, 计算方法见公式(11)。

$$Time_{kj} = \frac{Income_j}{12 \times workday_j \times worktime_j} \times \frac{distance_j}{speed_k} \times 365 \quad (11)$$

式中: $Income_j$ 为收入水平为 j 的消费者的年收入均值, 单位: 元/y; $workday_j$ 为消费者每月工作天数, 单位: d; $worktime_j$ 为消费者每天工作小时数, 单位: h; $distance_j$ 为消费者每日出行距离, 单位: km; $speed_k$ 为第 k 种出行方式的速度, 单位: km/h。

(2) 消费者的舒适度成本。应用刘永^[42]提出的车辆站立系数来衡量消费者出行舒适度, 根据房德威等^[44]提出的用车内拥挤度改善的支付意愿作为拥挤度费率指标来衡量居民的舒适度成本, 由于消费者为舒适度付出的成本还与使用公共交通的出行距离有关, 最终数据拟合得出的舒适度成本计算方法如下:

$$Comfcost_{kj} = Distance_j \times 1.998e^{-0.836\beta_k} \quad (12)$$

$$\beta_k = S_k / N_k \quad (13)$$

式中: $Comfcost_{kj}$ 为收入水平为 j 消费者选择出行方式 k 的舒适度成本, 单位: 元/y; $Distance_j$ 为消费者平均出行距离, 单位: km/y; β_k 为第 k 种出行方式的站立系数, 单位: m²/人; S_k 为第 k 种出行方式的车辆面积, 单位: m²; N_k 为第 k 种出行方式的乘客数量, 单位: 人。

(3) 消费者出行费用。消费者出行方式可选择燃油汽车和新能源汽车, 其出行费用计算见公式(14)、(15)。

$$Expen_1 = Price_1 + Tax + CEC_1 + MC_1 + ConChar \quad (14)$$

$$Expen_2 = Price_2 + CEC_2 + MC_2 - Sub \quad (15)$$

式中: $Expen_1$ 和 $Expen_2$ 分别为燃油汽车和电动汽车的出行成本, 单位: 元/y; $Price$ 为购车成本分摊到汽车寿命期内的成本年值, 单位: 元/y; Tax 为车辆购置税分摊到汽车寿命期内的成本年值, 单位: 元/y; CEC 为每年机动车的燃料费用, 元/y; MC 为年平均维护成本, 单位: 元/y; $Conchar$ 为燃油车拥堵收费, 单位: 元/y; Sub 是新能源汽车购车补贴分摊到汽车寿命期内的补贴年值, 单位: 元/y。

3.3 数据来源

3.3.1 城市客运交通相关参数

各种交通燃料的碳排放因子数据来源于 IPCC2006, 地铁运营能耗及碳排放强度受地铁列车编组数量影响较大, 不适用公式(1)的计算方法, 参考申晓鹏^[45]对北京市 16 条地铁线路的平均观测结果, 取值为 0.04 kgCO₂/人 km。不同类型机动车能耗数据来源于参考文献^[46,47], 各类车型占比数据来源于参考文献^[48]。公共汽电车和轨道交通客运量, 出租车和私人载客汽车保有量数据来源于国家统计局, 轨道交通单位建设成本使用京津冀三地最新建设的 3 条地铁的单位里程建设成本, 分别为 12.1 亿元/km、5.8 亿元/km 和 7.2 亿元/km。

3.3.2 消费者出行相关参数

根据参考文献^[49,50]将京津冀三地消费者分为低、中、高 3 类, 按照每个月工作 22 天, 每天工作 8 小时, 3 类消费者出行的单位时间成本分别为 7.5 元/h、31.8 元/h、141.0 元/h。根据参考文献^[51,42], 设定地铁的平均站立系数为 0.4 m²/人, 公交车平均站立系数为 0.8 m²/人, 根据公式(12)、(13)最终得到消费者选

2022年9月

择地铁和公交车出行的舒适度成本分别为19.8元/d和15.2元/d,私人汽车没有舒适度成本。燃油车与新能源汽车购置价格来源于比亚迪官网。根据国家电网北京市电力公司对北京市收费电价及峰谷时段划分以及收费标准,设电网公司对充电桩峰谷时间划分反应了消费者在不同时段充电的概率^[46],按照公共车桩与私人车桩1:3的分布比例,折算新能源汽车综合用电价格约为0.85元/(kW·h)。

4 京津冀城市客运交通政策情景设计

4.1 基准情景

根据历史数据,设置京津冀三地初始分别有1000、1000、550个消费者Agent,每个消费者Agent分别承担2.1亿人km、0.8亿人km、3.9亿人km周转量。自2020年开始,受新冠疫情影响,交通周转量出现了较大规模下降,2020年全国客运交通周转量比2019年下降50%;北京市、天津市和河北省2020年公路客运周转量比2019年分别下降58.1%、40.4%和61.6%^[52]。交通周转量的下降来源于疫情期间的强制性封锁和隔离,也来源于消费者交通行为的变化^[53],如线上办公、远程办公取代了部分交通出行等。因此,设定在2020—2035年的模拟期内,消费者Agent数量和结构变化依据历史行为规则发展,但是由于受到疫情的影响,消费者Agent的出行需求下降,在基准情景中用每个消费者Agent承担的周转量下降来表示。例如,2020年北京市公共汽(电)车客运周转量比2019年下降42.2%,轨道交通客运周转量同比下降42.1%,出租客运周转量同比下降47.4%,私人小汽车客运周转量减少14.7%^[51],根据以上数据对模型中的北京消费者Agent承担的周转量进行同比率调整。

消费者Agent在模拟期内选择出行方式,但不

同出行方式周转量承载力有限,根据京津冀客运交通周转量增长历史数据和已有政策,对各种交通出行方式的周转量增长做出限定,见表1。

4.2 碳减排政策情景

4.2.1 行政命令政策情景

河北省是京津冀地区唯一未实施机动车总量控制政策的地区,该情景中设定2020—2022年河北省城市私人汽车周转量增长速度上限为10.0%,2023—2025年增速上限为8.0%,2026—2030年实施更加严格的控制政策,其增速不超过5.0%,2030年后增速不超过2.0%。

4.2.2 经济激励政策情景

(1) 新能源汽车补贴政策情景

该情景中2020—2035年间新能源汽车补贴政策以充电端补贴为主,目前上海、北京和成都等城市充电桩运营补贴介于0.2~0.8元/(kW·h)之间,情景中设定充电补贴为0.4元/(kW·h),补贴后综合用电价格约为0.45元/(kW·h)。

(2) 交通拥堵收费政策情景

该情景中交通拥堵收费征收范围为京津冀三地城市区域在工作日7—20时内行驶的民用私人燃油车,根据车辆尾号限行政策,每周征收拥堵费4天。依据伦敦等地征收拥堵费经验,每日拥堵费收费标准约占居民日均可支配收入的5.0%~10.0%^[54],参照这一标准,根据京津冀三地城市居民人均可支配收入,设定京津冀三地拥堵费征收标准为9.3元/天。

4.2.3 技术进步政策情景

(1) 新能源汽车研发激励政策情景

影响新能源汽车价格的核心是动力电池价格,约占整车价格的31%。在该政策情景中,设定2025

表1 京津冀地区城市客运各类交通方式周转量增速(%)

Table 1 Growth rate of urban passenger transport turnover in the Beijing-Tianjin-Hebei region (%)

	北京市	天津市	河北省
公共汽车周转量增速上限	1.0	1.0	1.0
轨道交通周转量增速上限	2.3	8.0(2020—2025年)、4.0(2026—2030年)、2.0(2031—2035年)	25.0
燃油车周转量增速上限	40(在新增小客车总 周转量中的占比)	2.5	13.0
新能源汽车周转量增速上限	60(在新增小客车总 周转量中的占比)	15.0	13.0

注:北京市新增小客车总周转量不超过上年的2%。

年、2030年、2035年车用动力电池价格分别下降至650.0、600.0、550.0元/(kW·h),且在模拟期内电动车电池价格按照对数函数规律下降^[55]。

(2) 乘用车燃料效能提升政策情景

本文设定2035年交通系统中纯电动汽车和燃油车能耗比2019年降低25.0%,中间年度车辆能耗线性下降^[43]。

4.2.4 公共交通推广政策情景

公共交通推广政策侧重于在京津冀地区推广轨道交通,在该情景下,京津冀三地轨道交通增长的上限高于基准情景(表1),其中,北京市轨道交通周转量增速上限为3.0%,天津市轨道交通周转量增速上限在2020—2025年为9.0%、2026—2030年为5.0%、2031—2035年为3.0%,河北省轨道交通周转量增速上限为30.0%。

5 结果与分析

5.1 系统模型检验

本文使用NetLogo作为仿真模拟平台,为检验消费者Agent出行行为选择逻辑和出行成本参数的合理性,对关键性参数进行了敏感性分析和情景分析,最后保留误差最小的参数组合。

敏感性分析重点针对不确定性较强的参数,如公式(10)中, α, β, γ 为3种出行成本的权重系数,在参考文献^[42,43]研究成果的基础上,经过多次参数模拟,最后选择的参数值分别为0.5、0.2和0.3,该组参数值能够使模型模拟值与真实值具有最小误差(图3为保持舒适度成本权重不变,对时间成本权重进行 $\pm 10.0\%$ 和 $\pm 20.0\%$ 的敏感性分析结果)。

为检验模型整体参数的拟合效果,我们还对京津冀2015—2019年消费者出行选择过程进行模拟,并与实际数据对比,平均检验误差如图4所示。可知,京津冀城市客运交通系统各年度总周转量和碳排放量的模拟值与实际值的误差均在6.0%以下,认为模型中消费者Agent出行方式选择流程及核心参数具有可靠性。

5.2 碳减排政策的环境效益和经济成本模拟结果及分析

5.2.1 各碳减排政策的环境效益分析

图5为不同政策情景下京津冀地区2020—2035

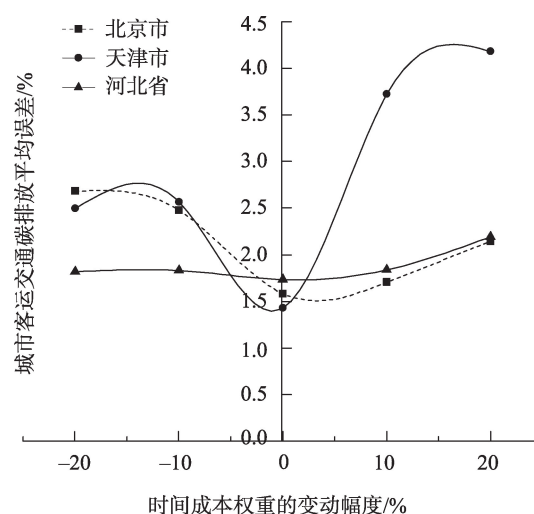


图3 出行成本权重敏感性分析结果

Figure 3 Sensitivity analysis results on travel cost weights

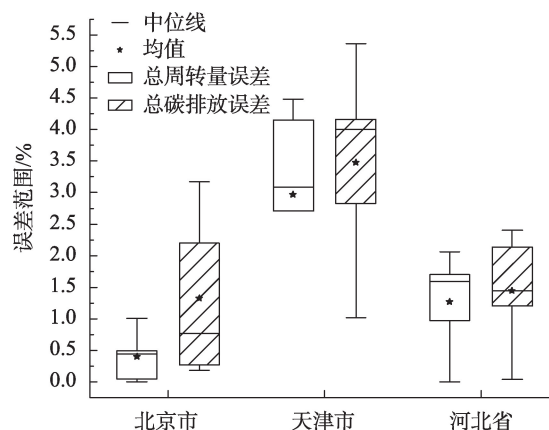


图4 系统检验误差

Figure 4 Error of system verification

年城市客运交通碳排放量模拟结果。在基准情景下,未来京津冀三地城市客运交通碳排放量均呈持续上升趋势,2035年北京市城市客运交通碳排放量预计达到1477.3万t,较2020年增长14.6%;天津市城市客运交通碳排放量预计在2035年达到641.0万t,较2020年增长9.7%;河北省城市客运交通碳排放量预计在2035年达到3449.2万t,较2020年增长69.4%。各政策实施后,碳减排效果差异显著,其中减排效果最好的是乘用车燃料效能提升政策,预计在未来15年间该政策将实现京津冀三地城市客运交通累计碳减排量分别为2354.0万t、1135.1万t和5899.7万t,分别可以实现10.0%、11.0%和12.3%的碳减排规模。

2022年9月

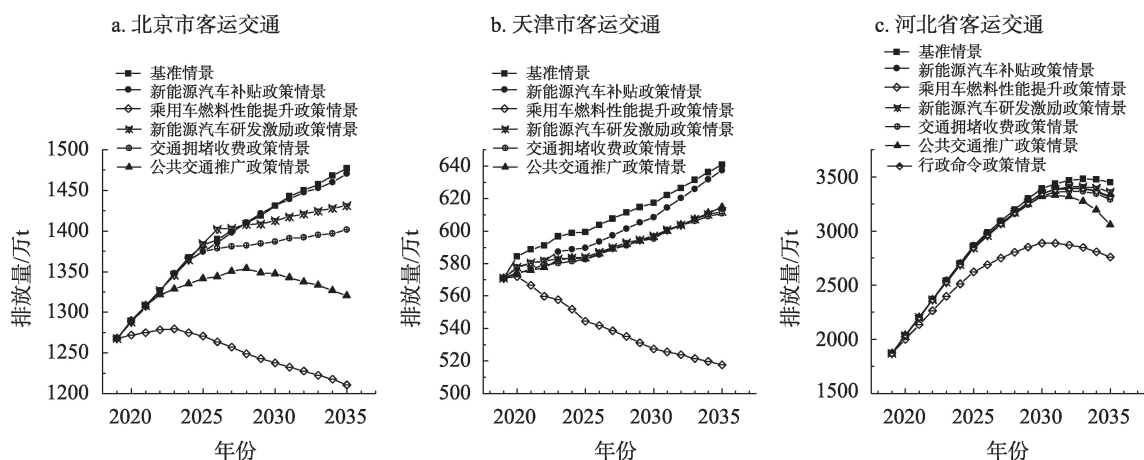


图5 2020—2035年京津冀地区城市客运交通碳排放量

Figure 5 Carbon emissions of urban passenger transport in the Beijing-Tianjin-Hebei region, 2020-2035

京津冀三地城市发展水平不均衡,面对在2030年实现交通部门碳排放达峰的目标,碳减排政策的实施效果在三地之间差异较大,京津冀地区实现碳排放达峰的时间不同。从北京市各政策的模拟结果看,乘用车燃料效能提升政策和公共交通推广政策都可以在2023—2028年间实现城市客运交通碳排放达峰;新能源汽车补贴政策和交通拥堵收费政策的组合实施也有望在2035年实现客运交通碳排放达峰。不同于北京市,乘用车燃料效能提升政策是唯一使天津市实现客运交通碳达峰的政策类型;公共交通推广政策情景在天津市实施的碳减排效果不佳,但公共交通推广政策和交通拥堵收费政策的组合实施有望在2035年实现客运交通碳排放达峰;河北省在所有政策情景中实现客运交通碳达峰的时间均晚于北京市和天津市,但各项碳减排政策的实施都能够在2030—2035年间实现客运交通碳排放达峰。

京津冀三地实现交通碳排放达峰的时间差异可能与三地城市客运增长速度、基准年(2019年)城市客运规模和结构有关。天津市城市客运总量最小,在各类出行方式中,燃油车占城市客运交通比重最高,并已经具备一定规模的公共交通基础设施,在2020—2035年间,其客运规模增长有限,因此乘用车燃料效能提升政策情景下,传统燃油车出行在被公共交通或电动汽车替代的同时,其燃油效率也不断提高,可以在最短时间内帮助天津市实现城

市客运交通的碳排放达峰。在基准年,北京市是京津冀地区公共交通、新能源汽车占城市客运交通出行总量比重最高的城市,其相对低碳的出行结构意味着对现阶段碳排放结构再进行优化难度较大,需要时间更长,因此在新增出行需求有限的情况下,北京市实现客运交通碳排放达峰的时间比天津市更晚。河北省以轨道交通为代表的公共交通建设处于起步阶段,在短时间内难实现较大规模的客运量,而且,河北省燃油车保有量占比最高,尽管乘用车燃料效能提升政策情景下,乘用车的能耗不断降低,但由于河北省城市客运需求仍将在未来的一段时间内保持高速增长,燃油车数量预计在未来一段时间内仍保持上升趋势,燃油车总量的上升抵消了燃油车效能提高所带来的减排效应,最终2030年河北省城市客运交通碳排放只有在乘用车燃料效能提升情景下才可以实现城市客运交通的碳排放达峰。

5.2.2 各碳减排政策的经济成本分析

图6为京津冀地区不同碳减排政策情景下的单位碳减排经济成本。行政命令政策、经济激励政策、公共交通推广政策和技术进步政策这4类政策中,在不考虑拥堵费的前提下,技术进步类政策是综合经济成本最低的政策情景,特别是乘用车燃料效能提升政策是所有情景中单位碳减排经济成本最低的。乘用车燃料效能提升和新能源汽车研发激励这两种技术进步政策共同实施时,京津冀三地的碳减排经济成本分别为47.4万元/万t、16.8万元/

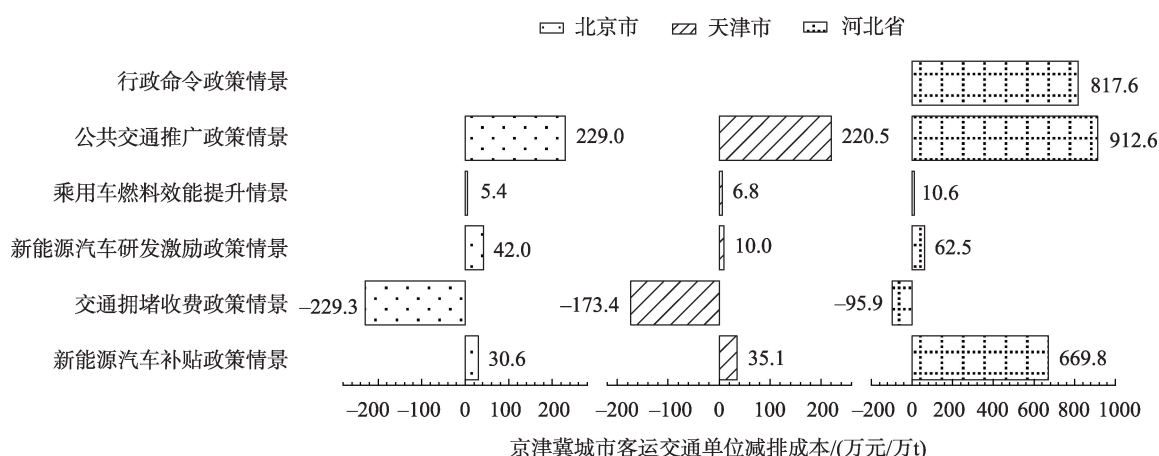


图6 京津冀地区城市客运交通单位减排成本

Figure 6 Unit carbon emission reduction cost of urban passenger transport in the Beijing-Tianjin-Hebei region

万t和73.1万元/万t。公共交通推广政策是单位碳减排经济成本最高的政策类型,京津冀三地的碳减排经济成本分别为229.0万元/万t、220.5万元/万t和912.6万元/万t,分别是技术进步政策的4.8倍、13.1倍和12.5倍。交通拥堵收费政策情景中,京津冀的单位碳减排经济成本分别为-229.3万元/万t、-173.4万元/万t和-95.9万元/万t,北京市基本可以覆盖轨道交通推广政策的经济成本,天津市约为其公共交通推广政策的经济成本78.6%,河北省则仅能覆盖其公共交通推广政策经济成本的10.5%。

京津冀3个地区中,北京市新能源汽车研发激励政策的碳减排经济成本高于天津市,而新能源汽车补贴政策的碳减排经济成本相对较低,交通拥堵收费政策的单位碳减排收益最高;天津市新能源汽车研发激励政策的碳减排经济成本在3个地区中相对较低,公共交通推广政策和新能源汽车补贴政策的单位碳减排经济成本和北京比较接近;河北省各类政策的单位碳减排经济成本差距较大,公共交通推广政策和行政命令政策碳减排经济成本比较高,公共交通推广政策的单位碳减排经济成本约为北京市和天津市的4.0倍,新能源汽车补贴政策的单位碳减排经济成本约为北京市和天津的20.0倍,而交通拥堵收费收益为北京的41.8%和天津的55.3%。影响京津冀3个地区碳减排经济成本差异的因素除了碳减排量,还包括基准情景中城市公共交通基础设施建设水平,以及预测期间轨道交通的

建设投资需求。在不同类别政策下,轨道交通增长速度具有一定差异:北京、天津新增城市客运需求较少,且公共交通基础设施建设较为完善,因此未来城市客运交通的单位碳减排经济成本较低,而河北省新增客运需求量较高,公共交通基础设施建设水平相对落后,未来其城市客运交通的碳减排经济成本压力较大。

6 结论与建议

6.1 结论

本文在考虑消费者异质性的基础上,通过构建基于Agent建模和仿真方法的京津冀城市客运交通系统模型,对京津冀地区城市客运交通碳减排政策的环境效益和经济成本进行了综合分析,得出以下结论:

(1)乘用车燃料效能提升政策是唯一可以在2030年使京津冀3个地区同时实现城市客运交通碳排放达峰的政策情景,且该政策的单位碳减排经济成本最低。此外,新能源汽车补贴政策及公共交通推广政策等的组合情景也可以分别在北京和天津市实现2035年城市客运交通碳排放达峰目标。

(2)从碳减排成本的角度看,京津冀3个地区中,北京市和天津市新能源汽车补贴政策的碳减排经济成本相对较低,河北省公共交通推广政策和新能源汽车补贴政策的单位碳减排经济成本分别约为北京市和天津市的4.0倍和20.0倍,其减排面临的成本压力较大。

2022年9月

(3)交通拥堵收费政策虽然在京津冀三地均有一定的碳减排效果,但其单独实施较难实现碳排放达峰目标,其与新能源汽车补贴政策的组合实施有望实现2035年北京市客运交通碳排放达峰,其与公共交通推广政策的组合实施有望实现2035年天津市客运交通碳排放达峰。交通拥堵收费政策的实施对于弥补北京市和天津市其他碳减排政策实施的经济成本将具有较大贡献,但对于弥补河北省其他碳减排政策实施的经济成本贡献有限。

(4)京津冀3个地区城市客运交通面对在2030年实现碳排放达峰目标的压力不同,北京市单位周转量碳减排经济成本压力较小,天津市预计碳减排速度最快,河北省碳减排总量和经济成本压力最大。

6.2 建议

基于以上研究结论,本文对京津冀城市客运交通碳减排政策规划提出以下建议:

(1)在制定和实施政策的过程中,要考虑到目前乘用车燃料效能提升是最有希望实现京津冀客运交通碳排放达峰的政策,因此需要强化对乘用车燃料效能提升的激励和监督。此外,在北京市和天津市实施组合政策也有望实现碳排放达峰,且具有良好的经济成本。

(2)如果仅以减少城市客运交通碳排放为目标进行政策设计,则公共交通推广政策在北京市和河北省城市的实施效果要好于天津市,但鉴于轨道交通高昂的经济成本,在河北省城市推广时更要综合评价其经济和社会效益。

(3)当碳减排政策经济成本支出压力较大时,可以考虑实施交通拥堵收费政策+其他政策的组合情景,缓解政府财政压力,将交通拥堵费收益用于支持公共交通发展或促进新能源汽车的使用,促进地方出行结构改善。

(4)对于河北省,不适宜采取类似北京市和天津市的行政命令政策限制燃油车数量,而是应该采取更加灵活和高效的技术进步政策和经济激励政策。河北省客运交通在京津冀3个地区中实现碳排放达峰的经济成本和时间压力最大,京津冀地区的协同发展,应给予河北省更多的支持和政策倾斜。

最后,需要指出的是,本文仍存在如下不足:①

城市客运交通系统是复杂的,政府、企业和消费者的行为应该是互相影响、多方博弈的结果,本文重点考虑了政府和企业的行为对消费者Agent的影响,并没有深入研究消费者Agent出行行为选择结果对政府和企业的影响;②本文仅对碳减排政策独立实施的效果进行了模拟,并未对各政策综合实施的Agent行为规则进行刻画和分析。以上不足,后续有待进一步深入研究。

参考文献(References):

- [1] Du H B, Liu D Y, Southworth F, et al. Pathways for energy conservation and emissions mitigation in road transport up to 2030: A case study of the Jing-Jin-Ji area, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 162: 882-893.
- [2] 马海涛, 康雷. 京津冀区域公路客运交通碳排放时空特征与调控预测[J]. 资源科学, 2017, 39(7): 1361-1370. [Ma H T, Kang L. Spatial and temporal characteristics and prediction of carbon emissions from road traffic in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Resources Science, 2017, 39(7): 1361-1370.]
- [3] 洪竞科, 李沅潮, 蔡伟光, 等. 多情景视角下的中国碳达峰模拟: 基于RICE-LEAP模型[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 639-651. [Hong J K, Li Y C, Cai W G, et al. Simulating China's carbon emission peak path under different scenarios based on RICE-LEAP model[J]. Resources Science, 2021, 43(4): 639-651.]
- [4] 王勇, 韩舒婉, 李嘉源, 等. 五大交通运输方式碳达峰的经验分解与情景预测: 以东北三省为例[J]. 资源科学, 2019, 41(10): 1824-1836. [Wang Y, Han S W, Li J Y, et al. Empirical decomposition and forecast of peak carbon emissions in five major transportation modes: Taking the three provinces in Northeast China as examples[J]. Resources Science, 2019, 41(10): 1824-1836.]
- [5] Ren L, Zhou S, Ou X M. Life-cycle energy consumption and greenhouse-gas emissions of hydrogen supply chains for fuel-cell vehicles in China[J]. Energy, 2020, DOI: 10.1016/j.energy.2020.118482.
- [6] Ahmadi P. Environmental impacts and behavioral drivers of deep decarbonization for transportation through electric vehicles[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 225: 1209-1219.
- [7] 刘固望, 闫强, 羊建波. 基于交通部门“S”形模型的全球石油需求展望[J]. 资源科学, 2018, 40(3): 547-557. [Liu G W, Yan Q, Yang J B. World oil demand based on S-Curve model of the transport sector[J]. Resources Science, 2018, 40(3): 547-557.]
- [8] 任梦磊, 杨斌, 李珺. 考虑能源结构和气候因素的电动汽车温室气体影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39(7): 2434-2441. [Ren M L, Yang B, Li J. Greenhouse gases impact of electric vehicles considering the influence of energy structure and climate[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(7): 2434-2441.]

- [9] Nugmanova A, Arndt W H, Hossain M A, et al. Effectiveness of ring roads in reducing traffic congestion in cities for long run: Big Almaty Ring Road case study[J]. Sustainability, 2019, DOI: 10.3390/su11184973.
- [10] Lee S. Transport policies, induced traffic and their influence on vehicle emissions in developed and developing countries[J]. Energy Policy, 2018, 121: 264–274.
- [11] Zhang S J, Niu T L, Wu Y, et al. Fine-grained vehicle emission management using intelligent transportation system data[J]. Environmental Pollution, 2018, 241: 1027–1037.
- [12] Yang Z W, Peng J F, Wu L, et al. Speed-guided intelligent transportation system helps achieve low-carbon and green traffic: Evidence from real-world measurements[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122230.
- [13] 李家印, 郭文忠, 李小燕, 等. 基于智能交通的隐私保护道路状态实时监测方案[J]. 通信学报, 2020, 41(7): 74–83. [Li J Y, Guo W Z, Li X Y, et al. Privacy-preserving real-time road conditions monitoring scheme based on intelligent traffic[J]. 2020, 41(7): 74–83.]
- [14] 刘清春, 张莹莹, 肖燕, 等. 济南市主城区私家车日常出行碳排放特征及影响因素[J]. 资源科学, 2018, 40(2): 262–272. [Liu Q C, Zhang Y Y, Xiao Y, et al. Characteristics and determinants of carbon emissions from daily private cars travel in central area of Jinan[J]. Resources Science, 2018, 40(2): 262–272.]
- [15] Hu Y J, Li X P. Modeling and analysis of excess commuting with trip chains[J]. Annals of the American Association of Geographers, 2021, 111(6): 1851–1867.
- [16] 荣培君, 张丽君, 刘荣增, 等. 开封城市家庭日常出行碳排放空间分异研究[J]. 资源科学, 2018, 40(6): 1307–1318. [Rong P J, Zhang L J, Liu R Z, et al. The spatial diversity of household daily travel carbon emissions in Kaifeng[J]. Resources Science, 2018, 40(6): 1307–1318.]
- [17] Xu W T, Yang L C, Zhang W. Evaluation of transport policy packages in the excess commuting framework: The case of Xiamen, China[J]. Cities, 2019, 87: 39–47.
- [18] 张清, 陶小马, 杨鹏. 特大型城市客运交通碳排放与减排对策研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(1): 35–42. [Zhang Q, Tao X M, Yang P. Research on carbon emissions from metropolis urban passenger transport and countermeasures[J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(1): 35–42.]
- [19] 王白雪, 郭琨. 北京市公共交通碳排放效率研究: 基于超效率SBM模型和ML指数[J]. 系统科学与数学, 2018, 38(4): 456–467. [Wang B X, Guo K. The efficient of carbon emissions efficiency of Beijing public transportation system: Based on super-efficiency SBM model using Malmquist-Luenberger Index[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2018, 38(4): 456–467.]
- [20] Zhang L L, Long R Y, Chen H, et al. Analysis of an optimal public transport structure under a carbon emission constraint: A case study in Shanghai, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(4): 3348–3359.
- [21] Zhang L L, Long R Y, Li W B, et al. Potential for reducing carbon emissions from urban traffic based on the carbon emission satisfaction: Case study in Shanghai[J]. Journal of Transport Geography, 2020, DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2020.102733.
- [22] Hysing E, Isaksson K. Building acceptance for congestion charges: The Swedish experiences compared[J]. Journal of Transport Geography, 2015, 49: 52–60.
- [23] 徐翌, 欧国立. 交通拥堵收费的理论依据和政策分析[J]. 中国工业经济, 2012, (12): 18–30. [Xu Z, Ou G L. Theoretical basis and policy analysis on congestion charge[J]. China Industrial Economics, 2012, (12): 18–30.]
- [24] 邵丹娜, 刘学敏. 意愿价值评估法在城市管理决策中的应用: 以杭州市拟征收交通拥堵费的意愿调查为例[J]. 城市发展研究, 2015, 22(2): 118–124. [Shao D N, Liu X M. Application of contingent valuation method on evaluating urban management policy: A contingent valuation on potential congestion charge during the peak hour in Hangzhou city[J]. Urban Development Studies, 2015, 22(2): 118–124.]
- [25] 杨浩雄, 孔丹. 城市交通拥堵收费政策效用研究[J]. 价格理论与实践, 2017, (6): 66–70. [Yang H X, Kong D. The effectiveness of urban traffic congestion charge policy[J]. Price: Theory & Practice, 2017, (6): 66–70.]
- [26] 曹静, 王鑫, 钟笑寒. 限行政策是否改善了北京市的空气质量? [J]. 经济学(季刊), 2014, 13(3): 1091–1126. [Cao J, Wang X, Zhong X H. Did driving restrictions improve air quality in Beijing? [J]. China Economic Quarterly, 2014, 13(3): 1091–1126.]
- [27] Chen S, Zheng X, Yin H T, et al. Did Chinese cities that implemented driving restrictions see reductions in PM10? [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020, DOI: 10.1016/j.trd.2019.102208.
- [28] 孙传旺, 徐淑华. 城市机动车限行对PM2.5的影响与效果检验[J]. 中国管理科学, 2021, 29(1): 196–206. [Sun C W, Xu S H. Analysis of the impact and effect test of urban vehicles restriction on PM2.5 emission[J]. China Journal of Management Science, 2021, 29(1): 196–206.]
- [29] Ou S, He X, Ji W, et al. Machine learning model to project the impact of COVID-19 on US motor gasoline demand[J]. Nature Energy, 2020, 5: 666–673.
- [30] Hu S H, Chen P. Who left riding transit? Examining socioeconomic disparities in the impact of COVID-19 on ridership[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2021, DOI:

2022年9月

- 10.1016/j.trd.2020.102654.
- [31] Patel H, Talbot N, Salmond J, et al. Implications for air quality management of changes in air quality during lockdown in Auckland (New Zealand) in response to the 2020 SARS-CoV-2 epidemic[J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.07.104.
- [32] Maria C C, Alessandro A, Giorgio B, et al. Lockdown for CoViD-2019 in Milan: What are the effects on air quality?[J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139280.
- [33] Xin Y L, Shao S Q, Wang Z C, et al. COVID-2019 lockdown in Beijing: A rare opportunity to analyze the contribution rate of road traffic to air pollutants[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, DOI: 10.1016/j.scs.2021.102989.
- [34] Diao M. Towards sustainable urban transport in Singapore: Policy instruments and mobility trends[J]. *Transport Policy*, 2019, 81: 320-330.
- [35] Green C P, Heywood J S, Paniagua M N. Did the London congestion charge reduce pollution?[J]. *Regional Science and Urban Economics*, 2020, DOI: 10.1016/j.regsciurbeco.2020.103573.
- [36] Ding H L, Sze N N, Li H J, et al. Affected area and residual period of London Congestion Charging scheme on road safety[J]. *Transport Policy*, 2021, 100: 120-128.
- [37] Li X, Yu B Y. Peaking CO₂ emissions for China's urban passenger transport sector[J]. *Energy Policy*, 2019, DOI: 10.1016/j.enpol.2019.110913.
- [38] Zhao F Q, Liu F Q, Liu Z W, et al. The correlated impacts of fuel consumption improvements and vehicle electrification on vehicle greenhouse gas emissions in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 207: 702-716.
- [39] Lopez N S, Soliman J, Biona J B M, et al. Cost-benefit analysis of alternative vehicles in the Philippines using immediate and distant future scenarios[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2020, DOI: 10.1016/j.enpol.2019.110913.
- [40] Bilgili L, Kuzu S L, Cetinkaya A Y, et al. Evaluation of railway versus highway emissions using LCA approach between the two cities of Middle Anatolia[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, DOI: 10.1016/j.scs.2019.101635.
- [41] Chen S, Wu J, Zong Y. The impact of the freight transport modal shift policy on China's carbon emissions reduction[J]. *Sustainability*, 2020, DOI:10.3390/su12020583.
- [42] 刘永. 基于出行选择行为的城市公共交通票价研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2016. [Liu Y. Public Transportation Fares Research Based on Travel Choice Behavior[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2016.]
- [43] 张卫华, 刘冉冉, 颜鹏, 等. 考虑舒适度因素的出行价值模型[J]. *公路交通科技*, 2020, 37(5): 116-122. [Zhang W H, Liu R R, Yan P, et al. A travel value model considering comfort factors[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2020, 37(5): 116-122.]
- [44] 房德威, 何东坡, 王立峰, 等. 城市轨道交通车厢内拥挤成本的估计方法[J]. *交通运输工程学报*, 2018, 18(6): 121-130. [Fang D W, He D P, Wang L F, et al. Estimation method of crowding cost in urban rail transit carriages[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2018, 18(6): 121-130.]
- [45] 申晓鹏. 城市轨道交通碳减排测算理论与应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018. [Shen X P. Study on Calculation Theory and Application of Carbon Emission Reduction of Urban Rail Transit: Taking Beijing As an Example[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.]
- [46] Pagani M, Korosec W, Chokani N, et al. User behavior and electric vehicle charging infrastructure: An agent-based model assessment [J]. *Applied Energy*, 2019, DOI:10.1016/j.apenergy.2019.113680.
- [47] 张秀媛, 杨新苗, 闫琰. 城市交通能耗和碳排放统计测算方法研究[J]. *中国软科学*, 2014, (6): 142-150. [Zhang X Y, Yang X M, Yan Y. Statistical estimation method for energy consumption and carbon emissions by urban transport[J]. *China Soft Science*, 2014, (6): 142-150.]
- [48] 交通运输部. 2019年交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. (2020-05-12)[2022-03-07]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-05/12/content_5510817.htm. [Ministry of Transport of the People's Republic of China. Statistical Bulletin on the Development of Transportation in 2019[EB/OL]. (2020-05-12)[2022-03-07]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-05/12/content_5510817.htm.]
- [49] 李培林. 怎样界定中等收入群体更准确[N/OL]. (2017-07-17)[2021-09-05]. http://news.cssn.cn/zx/yw/201707/t20170717_3581342.shtml. [Li P L. How to Define the Middle-Income Group More Accurately[N/OL]. (2017-07-17)[2021-09-05]. http://news.cssn.cn/zx/yw/201707/t20170717_3581342.shtml.]
- [50] 中国社会科学调查中心. 2018年中国家庭追踪调查(CFPS)[EB/OL]. (2020-12-31)[2021-10-18]. <http://www.issn.pku.edu.cn/cfps/sjzx/gksj/index.htm>. [Institute of Social Science Survey. China Family Panel Studies (CFPS)[EB/OL]. (2020-12-31)[2021-10-18]. <http://www.issn.pku.edu.cn/cfps/sjzx/gksj/index.htm>.]
- [51] 北京交通发展研究院. 2020北京交通发展年报[EB/OL]. (2021-09-25)[2021-12-30]. <https://www.bjtrc.org.cn/List/index/cid/7.html>. [Beijing Transport Institute. 2020 Beijing Transportation Development Annual Report[EB/OL]. (2021-09-25)[2021-12-30]. <https://www.bjtrc.org.cn/List/index/cid/7.html>.]
- [52] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021. [National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistical Press, 2021.]
- [53] Huang J Z, Wang H F, Fan M, et al. Understanding the Impact of the COVID-19 Pandemic on Transportation-Related Behaviors

- with Human Mobility Data[C]. San Diego: The 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining, 2020.
- [54] 卢真, 崔宇宁. 发达地区交通拥堵费制度比较及北京市方案探讨[J]. 经济研究参考, 2016, (34): 25–31. [Lu Z, Cui Y N. Comparison of traffic congestion fee system in developed areas and discussion on Beijing scheme[J]. Review of Economic Research, 2016, (34): 25–31.]
- [55] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图2.0[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020. [China Society of Automotive Engineers. Energy Saving and New Energy Vehicle Technology Roadmap 2.0[M]. Beijing: China Machine Press, 2020.]

Cost-benefit analysis of carbon emission mitigation policies for urban passenger transport in the Beijing-Tianjin-Hebei region

ZHENG Yuhua¹, JIA Yiwei^{1,2}

(1. School of Economics and Management, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China; 2. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Corp., LTD., Jinan 250013, China)

Abstract: Passenger transport accounts for a high proportion of the total traffic volume in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region, and its emission reduction potential is a key factor affecting the peaking of traffic-related carbon emissions. This study established the urban passenger transport system model in the BTH region based on agent modeling and simulation method. It then simulated consumer's travel behavior under different scenarios of urban passenger transport carbon emission reduction policies in the region, and evaluated the environmental benefits and economic costs of various carbon emission reduction policies and their impact on carbon peaking. The research results show that: (1) The policy of fuel efficiency improvement of passenger vehicles is the only policy scenario that can achieve the peaking of carbon emissions of urban passenger transport in the BTH region by 2030 with relatively low carbon emission reduction cost. Tianjin is expected to achieve the peaking of carbon emissions first, followed by Beijing, and Hebei Province will be the last. (2) The carbon emission reduction cost of public transport promotion policy is relatively high, especially in Hebei Province. Although the policy can also achieve the peaking of carbon emissions of urban passenger transport in Beijing Municipality and Hebei Province, it fails to achieve the goal of carbon emission peaking in Tianjin Municipality. (3) The transport congestion charge policy alone would not achieve the goal of carbon emission peaking, and it needs to be implemented in combination with other policies. To achieve the goal of passenger transport carbon emission peaking in the BTH region, it is necessary to continuously promote the policy of improving the fuel efficiency of passenger vehicles. It is also possible to adopt a combination of policies such as subsidies for new energy vehicles, public transport promotion, and transport congestion charges to reduce the economic cost of emission reduction.

Key words: urban transportation; cost-benefit of carbon emission reduction; agent-based simulation; transport carbon emission; scenario analysis; Beijing-Tianjin-Hebei region