引入碳交易机制的新能源汽车发展路径研究

李文翔[1]，李晔[2*]，董洁霜[1]，李一鸣[1]
(1. 上海理工大学 管理学院，上海 200093；2. 同济大学 交通运输工程学院，上海 201804)

摘要：中国新能源汽车进入“后补贴时代”，亟需探索建立市场化发展的长效机制。*引入道路交通碳交易机制替代财政补贴，形成市场化激励与惩罚机制，建立起燃油汽车反哺新能源汽车的市场机制。采用系统动力学解析道路交通碳交易机制影响新能源汽车发展的关键政策参数，构建基于多智能体的道路交通碳交易仿真模型，并对引入碳交易机制的新能源汽车发展路径进行仿真预测。*结果表明：在各发展路径下，2030 年和 2050 年的中国新能源汽车市场份额分别能够达到 50%~85%和 91%~98%，反映引入道路交通碳交易机制可以有效促进“后补贴时代”新能源汽车跨越式发展。

关键词：新能源汽车；碳交易机制；多主体协同；智能体建模与仿真；系统动力学
中图分类号：TP391.9; U469.7 文献标志码：A 文章编号：1004-731X (2021) 06-1451-15
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0006

Development Paths of New Energy Vehicles Incorporating CO_2 Emissions Trading Scheme

Li Wenxiang[1], *Li Ye*[2*], *Dong Jieshuang*[1], *Li Yiming*[1]
(1. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 2010804, China)

Abstract: New energy vehicles in China have entered the “post-subsidy era”, and it is urgent to explore and establish a long-term mechanism for market-oriented development. *The CO_2 emission trading scheme for road transport (ETS-RT) is introduced to replace financial subsidies, forming a market-oriented incentive and punishment mechanism. Therefore, a market mechanism is established where internal combustion engine vehicles feed new energy vehicles. A causal loop diagram of system dynamics was used to analyze the key policy parameters of the ETS-RT that affect the development of new energy vehicles. Then a multi-agents-based model of ETS-RT is established to simulate the development paths of new energy vehicles incorporating ETS-RT.* The results show that: the market share of new energy vehicles in 2030 and 2050 may reach 50%–85% and 91%–98% respectively under the development paths. It reflects that the introduction of ETS-RT can effectively promote the leaping development of China's new energy vehicles in the “post-subsidy era”.

Keywords: new energy vehicle; CO_2 emission trading scheme; multi-agent collaboration; agent-based modeling and simulation; system dynamics

引言

发展新能源汽车既是我国保障石油安全、保护环境和应对气候变化的战略需要，也是我国从汽车大国迈向汽车强国的必经之路。2009 年以来，在国家补贴政策的大力支持下，我国新能源汽车的推广应用取得了较大进展，年销量由 2009 年的不足

收稿日期：2021-01-04 修回日期：2021-03-15
基金项目：国家自然科学基金(52002244，71774118)；上海市科技创新行动计划软科学项目(20692192200)；上海市浦江人才计划(2020PJC083)；上海市晨光计划(20CG55)
第一作者：李文翔(1992-)，男，博士，讲师，研究方向为低碳交通。E-mail：liwx@usst.edu.cn
通讯作者：李晔(1974-)，男，博士，教授，研究方向为交通治理、公共政策。E-mail: jamesli@tongji.edu.cn

500 辆跃升至 2019 年的 120.6 万辆[1]，连续 5 年世界第一。然而随着新能源汽车产销量继续增长，大规模的财政补贴政策已难以为继。因此，国家先后出台调整政策，补贴标准逐年退坡，并计划于 2023 年完全取消电动汽车补贴，由市场决定新能源汽车的发展方向，标志着中国新能源汽车市场即将迈入“后补贴时代”。此外，2020 年 11 月国务院办公厅发布的《新能源汽车产业发展规划(2021—2035 年)》强调要充分发挥市场在资源配置中的决定性作用，并提出要“完善企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分并行管理办法，有效承接财政补贴政策，研究建立与碳交易市场衔接机制。”这意味着中国新能源汽车发展将由政策主导过渡到市场驱动，因此亟需探索建立新能源汽车市场化发展的长效机制。

针对上述现实问题与发展需求，本文提出引入道路交通碳交易机制[2-3]替代国家财政补贴，形成市场化激励与惩罚机制，接力新能源汽车补贴政策的退坡，建立起燃油汽车反哺新能源汽车的市场机制，进而促进“后补贴时代”新能源汽车快速发展。然而，道路交通碳交易目前尚未在任何国家或地区正式实践过，是一种政府为完成控排目标及推动新能源汽车发展的探索性政策手段[2]，对于其制度设计、作用机理、影响效应以及不确定性还有待深入研究。因此，本文将构建一种政府 - 企业 - 居民协同共治的道路交通碳交易机制，融合系统动力学模型与多智能体建模与仿真，模拟分析道路交通碳交易不同政策参数对新能源汽车市场发展的影响效应，并预测道路交通碳交易机制下的新能源汽车市场发展趋势，进而提出后补贴时代新能源汽车的发展路径与政策建议。

许多学者曾对不同国家和地区的新能源汽车市场扩散与发展趋势进行预测，其研究方法主要可分为两类：一类是自上而下的宏观建模方法——系统动力学(System Dynamics, SD)模型[4]，另外一类是自下而上的微观建模方法——基于智能体(Agent- based，AB)的仿真模型[5]。

一方面，系统动力学模型能够清晰地揭示系统内部结构与各要素之间的因果关系，进而仿真系统内部各要素的演化过程与交互影响，非常适合于新能源汽车中长期发展规模的宏观预测[6-10]。例如，Keles 等[6]运用系统动力学模型对德国燃料电池汽车市场扩散中消费者、企业、加油站和政府等利益相关者进行结构分析，预测在氢燃料免税、燃料电池汽车补贴、加氢站补贴等组合政策情景下，2040 年和 2050 年德国的氢燃料电池乘用车市场份额将分别达到 1/3 和 2/3。Wang 等[8]采用系统动力学模型分析了中国新能源汽车补贴政策在 2021 年补贴取消后，当年新能源汽车销售市场份额将急剧下降 42%，其中纯电动汽车下降 50%。王浩淞[10]利用系统动力学模型，对引入市场机制的新能源汽车推广模式进行仿真，预测中国新能源汽车保有量自 2023 年开始大幅度超越原有的模式水平，2024 年将超过 1 500 万辆。

另一方面，基于智能体的模型通过将复杂系统中各类主体行为及其之间的交互关系用 Agent 的方式建模仿真，能够从微观层面预测新能源汽车的市场扩散与发展[11-18]。例如，Schwoon[13]采用基于 Agent 的模型研究了德国燃料电池汽车在不同燃油税和基础设施发展情景下的市场扩散，结果表明：不同的消费者和汽车生产对于燃油税政策的响应是不同的。Shafiei 等[14]在基于 Agent 的模型中加入 multinomial logit (MNL)离散选择模型，考虑了不同偏好的消费者对于不同类型汽车的购买选择意愿，分别预测了不同汽油价格、电动汽车购买价格、车辆购置税等情景下冰岛 2012－2030 年的电动汽车市场份额演化趋势。严筱[17]结合“NW 小世界网络模型”，构建了多类产品竞争下新能源汽车市场扩散的多 Agent 仿真模型，对中国 2016－2022 年新能源汽车市场进行了情景仿真。

然而，已有研究大多数基于其中一类方法对新能源汽车市场进行预测，并且都未曾考虑引入道路交通碳交易机制后的新能源汽车发展路径。因此，本文的学术贡献在于：将自上而下的系统动力学方

法和自下而上的多智能体建模与仿真相结合，构建碳交易机制下的新能源汽车市场仿真平台，既可对道路交通碳交易政策作用下异质责任主体的行为响应进行微观层面分析，又可对道路交通碳交易政策的影响效应进行宏观层面预测。

1 基于系统动力学的道路交通碳交易政策影响机理分析

由于道路交通碳排放涉及的行业和责任主体众多，按上游、中游、下游可分为燃料供应企业、汽车生产企业、汽车使用者 3 类不同的责任主体。为了提高道路交通碳交易的公平性、社会参与度与减排效率，本文提出同时将燃料供应企业(包括加油站、加气站、加氢站以及为新能源汽车提供电能的充换电站运营企业等)、汽车生产企业(包括传统燃油汽车与新能源汽车生产企业)、汽车使用者(包括使用私人小汽车出行的居民与运输企业)作为道路交通碳排放的责任主体，建立一种政府 - 企业 - 居民协同共治的道路交通碳交易机制，其基本架构如图 1 所示。

政府通过初始碳配额分配和行业基准设定建立总量控制与碳配额交易制度，不同责任主体根据各自边际减排成本选择成本最低的减排策略，借助市场机制激励各责任主体主动投资先进的减排技术，例如：燃料供应企业可通过改变燃料成分或生产低碳燃料来降低燃料排放因子，汽车生产企业可通过提高车辆燃油经济性或新能源汽车比例来降低汽车能耗强度，汽车使用者可通过减少车公里降低交通需求或购买新能源汽车，进而实现道路交通碳排放 3 个驱动因素：燃料排放因子、车辆能耗强度、交通活动需求的协同优化。

可见，碳交易机制影响下的新能源汽车市场是一个非线性发展的复杂社会-技术系统,涉及多类主体与变量的交互。因此，本文借用系统动力学的思想，采用因果回路图(Causal Loop Diagram, CLD)解析道路交通碳交易各主体与变量间的反馈结构，进而找出道路交通碳交易机制驱动新能源汽车市场发展的关键因素，如图 2 所示。图中红色字体为汽车使用者内部变量，绿色字体为汽车生产企业内部变量，紫色字体为燃料供应企业内部变量，而黑色字体为环境外部变量，其中黑色加粗字体为政策变量，即可由政府直接控制的道路交通碳交易政策参数，其余外部变量为非政策变量。

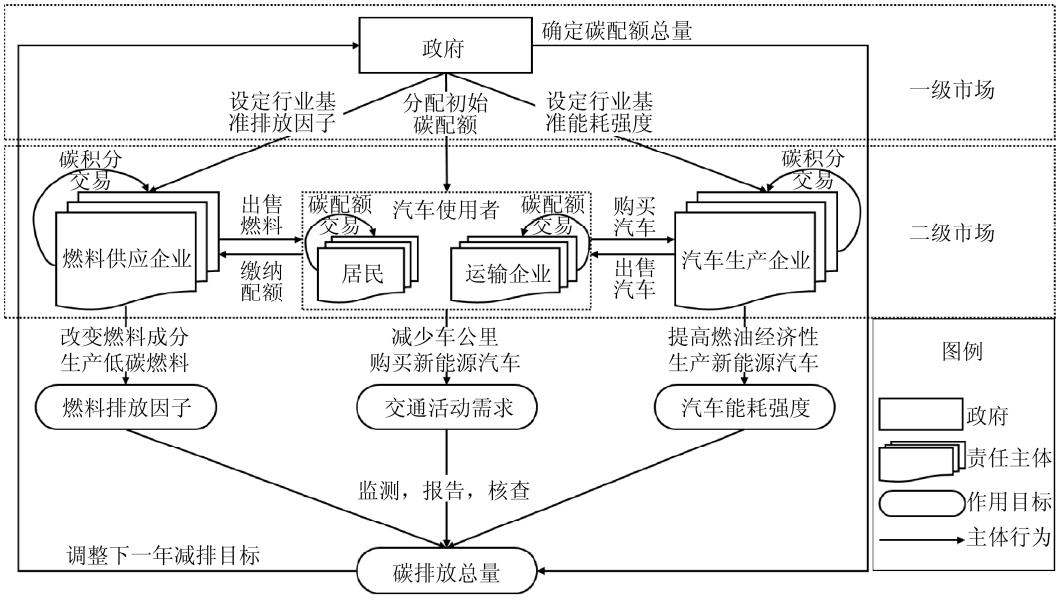


图 1 政府-企业-居民协同共治的道路交通碳交易基本架构

Fig. 1 Framework of CO_2 emission trading system for road transport collaboratively governed by the government, enterprises, and residents

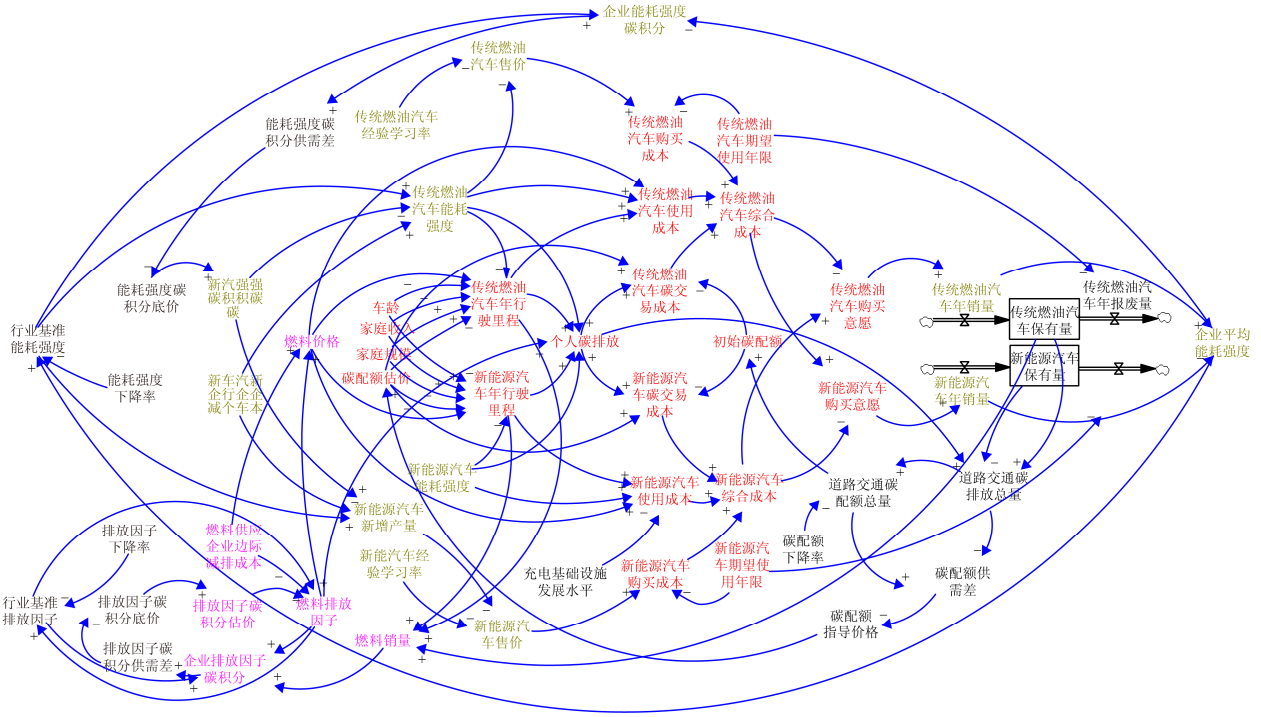


图 2　道路交通碳交易因果回路

Fig. 2　Causal loop diagram of CO_2 emission trading for road transport

根据图 2 的因果关系分析可总结得出道路交通碳交易影响新能源汽车发展的关键政策参数包括：碳配额下降率、碳配额指导价格、能耗强度下降率、能耗强度碳积分底价、排放因子下降率、排放因子碳积分底价、充电基础设施发展水平。其中，碳配额下降率、碳配额指导价格为下游(D)政策参数：主要影响汽车使用者对新能源汽车的购买与使用；能耗强度下降率、能耗强度碳积分底价为中游(M)政策参数：主要影响汽车生产企业对于新能源汽车的生产与定价；排放因子下降率、排放因子碳积分底价为上游(U)政策参数：主要影响燃料供应企业对于传统燃油汽车燃料的生产与定价；充电基础设施发展水平为充电(C)政策参数：主要影响新能源汽车充电的方便程度。上述政策参数均对新能源汽车市场产生正反馈，即参数值越大，新能源汽车市场份额越大。因此，下文将聚焦于上述 7 个碳交易政策参数对新能源汽车发展的影响，并将通过情景仿真分析不同政策参数组合下的新能源汽车发展路径。

2　道路交通碳交易多智能体建模与仿真

上述建立的道路交通碳交易机制涉及多类具有自主行为能力的主体，各主体之间通过相互影响与相互作用进而不断演化，属于典型的复杂适应系统，因此本文将基于多 Agent 模型，分别对政府、汽车使用者、汽车生产企业、燃料供应企业在道路交通碳交易机制作用下的决策行为进行建模与仿真，进而分析道路交通碳交易的微观作用机理。

2.1　模型基本假设

为了构建道路交通碳交易多智能体建模与仿真模型，需要作如下基本假设与合理简化：

假设 1. 在道路交通碳交易机制实施后，假设政府不再对消费者购买新能源汽车进行财政货币补贴，而过渡为通过市场机制促进新能源汽车发展。

假设 2. 由于运输企业数据难以获得，且其行为决策影响因素不确定，本文模型中的汽车使用者

暂且只考虑居民，而不考虑运输企业。每个居民在履约期内最多可拥有一辆汽车，并基于自身属性和当前拥有的汽车参数做出决策行为。

假设 3. 假设计划购买汽车的消费者随机选择汽车品牌和车系，且对于相同品牌、相同车系、相同配置的传统燃油汽车和新能源汽车没有特殊偏好，购车行为是完全经济理性的，即消费者购车选择以综合成本最小化为出发点。

假设 4. 假设每个汽车生产企业只生产同一种车系的汽车，但提供三款动力类型的汽车给消费者选择，分别是传统燃油汽车、插电式混合动力汽车和纯电动汽车，其中后两者为新能源汽车，除了能耗强度要低于传统燃油汽车，其他配置上与传统燃油汽车并无明显差异。由于燃料电池汽车目前技术尚不成熟，还不具备市场化的条件，故本文暂不考虑。

假设 5. 假设燃料供应企业只提供汽油这一种类型的燃料，但可以选择在汽油中混合一定比例的低碳燃料，以降低燃料的排放因子。

假设 6. 不同燃料类型的汽车能耗强度，均按等效热值法转换为当量汽油消耗量，以便于比较和计算。例如：1 kW·h 电能消耗量可以转换为 0.113 L 汽油消耗量(参照国家标准 GB/T 2589-2008)。

2.2 多主体行为建模

2.2.1 政府决策行为分析

政府作为道路交通碳交易市场的构建者和监管者，其决策行为主要包括：碳配额总量设定、初始碳配额分配、行业基准设定、价格稳定与市场调控等。

(1) 碳配额总量设定

对于已有汽车，政府需要根据历史平均碳排放强度和相对强度减排目标(通常以碳配额下降率表示)，计算本年度(t)已有汽车的基准碳排放强度，如式(1)所示。并根据本年度各车型已有汽车的数量设定本年度的碳配额总量，如式(2)所示。

$$BC_i^e(t)=\frac{TCE_i^e(t-1)}{NV_i^e(t-1)}\cdot\left[1-RCE_i^e(t)\right] \tag{1}$$

$$CAP^e(t)=\sum_i BC_i^e(t)\cdot NV_i^e(t) \tag{2}$$

式中：上标 e 为已有汽车；下标 i 为汽车类型；$BC_i^e(t)$ 为本年度已有汽车 i 的基准碳排放强度；$TCE_i^e(t-1)$ 为上一年度已有汽车 i 的碳排放总量；$NV_i^e(t-1)$ 为在上一年度已有汽车 i 的保有量；$RCE_i^e(t)$ 为本年度已有汽车 i 的碳配额下降率，可以由政府根据不同车型的减排潜力分别确定；$CAP^e(t)$ 为本年度已有汽车 i 的碳排放总量设定值；$NV_i^e(t)$ 为本年度已有汽车 i 的数量。

对于相同车型的新增汽车，由于新增汽车往往采用更先进的节能技术和更清洁的能源，具有更大的减排潜力，因此新增汽车的碳配额下降率应该大于已有汽车，其基准碳排放强度计算如式(3)所示。然后政府根据历年各类型汽车新注册数量或销量的变化趋势，结合政府对汽车数量调控的政策最终确定目标年新增汽车的数量，进而计算新增汽车的碳配额总量，如式(4)所示。

$$BC_i^n(t)=\frac{TCE_i^e(t-1)}{NV_i^e(t-1)}\cdot\left[1-RCE_i^n(t)\right] \tag{3}$$

$$CAP^n(t)=\sum_i BC_i^n(t)\cdot NV^n{}_i(t) \tag{4}$$

式中：上标 n 为新增汽车；$BC_i^n(t)$ 为本年度新增汽车 i 的基准碳排放强度；$RCE_i^n(t)$ 为本年度新增汽车 i 的碳配额下降率；$CAP^n(t)$ 为本年新增汽车的碳排放总量设定值；$NV_i^n(t)$ 为本年度新增汽车 i 的数量。

(2) 初始碳配额分配

为了保证公平分配与提高参与积极性，本文建议在道路交通碳交易建设初期采用免费分配的基准线法，主要根据不同车型的基准碳排放强度，向汽车使用者平等分配碳配额。为了便于登记和管理，政府将通过每年的汽车注册或年检，把该车型的相应的碳配额发放到对应汽车的碳账户，汽车所有人对该碳账户拥有使用权和转让权。因此，汽车使用者的初始碳配额由其所拥有的已有汽车数量

和新增汽车数量决定，如式(5)所示。

$$CE_0(u,t)=\sum_i BC_i^e(t)\cdot NV_i^e(u,t)+\sum_i BC_i^n(t)\cdot NV_i^n(u,t) \tag{5}$$

式中：u 为任意汽车使用者；$CE_0(u,t)$ 为汽车使用者 u 在本年度的碳初始配额；$NV_i^e(u,t)$ 为汽车使用者 u 在本年度已有汽车 i 的数量；$NV_i^n(u,t)$ 为汽车使用者 u 在本年度新增汽车 i 的数量。根据假设 2，$NV_i^e(u,t)$ 和 $NV_i^n(u,t)$ 只能为 0 或 1，且两者之和不超过 1。

(3) 行业基准设定制度

为了激励汽车生产企业提高车辆燃油经济性和发展新能源汽车，政府应该根据不同类型汽车的减排潜力和上一年度的平均能耗强度，设定本年度汽车能耗强度的下降率和目标值，即行业基准能耗强度 $FC_i^b(t)$ 为

$$FC_i^b(t)=\overline{FC_i}(t-1)\cdot\left[1-RCC^{FC}(t)\right] \tag{6}$$

式中：$\overline{FC_i}(t-1)$ 为车型 i 的所有汽车在上一年度的实际平均能耗强度；$RCC^{FC}(t)$ 为本年度汽车能耗强度的下降率。

同时，为了促进燃料供应企业优化燃料成分或增加可再生能源比例，进而降低碳排放因子，政府应该根据不同类型燃料的减排潜力和上一年度的平均排放因子，设定本年度排放因子的下降率和目标值，即行业基准排放因子 $EF_j^b(t)$ 为

$$EF_j^b(t)=\overline{EF_j}(t-1)\cdot\left[1-RCC^{EF}(t)\right] \tag{7}$$

式中：$\overline{EF_j}(t-1)$ 为燃料 j 的在上一年度的实际平均排放因子；$RCC^{EF}(t)$ 为本年度燃料排放因子的下降率。

(4) 价格稳定与市场调控

政府需要根据减排目标和行业平均减排成本设定碳配额指导价格，并实行涨跌幅限制，涨跌幅最大比例为 50%。即汽车使用者在公开竞价时，其报价不能超过或低于指导价格的 50%。每当一个新的履约交易期开始，政府需要根据上一履约交易期的碳配额相对供需差，调整碳配额指导价格。

对于汽车生产企业和燃料供应企业，由于不同的企业边际减排成本差异较大，故对于碳积分交易价格不设置指导价格，而是设定碳积分价格底线和 2 倍的惩罚价格，并根据上一履约交易期的市场供需关系调整碳积分底线价格。

2.2.2 汽车使用者决策行为分析

汽车使用者在道路交通碳交易机制下的决策行为包括：碳配额市场价格预估、汽车选择决策、行驶里程决策、碳配额交易。汽车使用者通过购买汽车行为与汽车生产企业交互，通过购买燃料行为与燃料供应企业交互。

(1) 碳配额估价决策

碳配额的市场价格作为一个传递信号影响着汽车使用者的各种行为决策。因此，首先汽车使用者需要根据政府制定的碳配额指导价格，结合自身的判断，对碳配额的市场价格进行预估，此价格亦是该汽车使用者在碳交易时的报价。由于碳交易市场还处于初级阶段，汽车使用者可收集到的关于市场的信息很少，因此本文假设所有汽车使用者采用“零信息”交易策略[19]，即交易者仅在一定区间内随机选取报价，而不考虑任何市场信息。由于政府对碳配额交易设置了指导价格和最高 50%的涨跌幅，因此汽车使用者对市场价格的预估值可表示为

$$PCE(u,t)=PCE_0(t)\cdot\left[1+\theta(u,t)\right] \tag{8}$$

式中：$PCE(u,t)$ 为汽车使用者 u 在本年度的碳配额估价；$PCE_0(t)$ 为本年度碳配额指导价格；$\theta(u,t)$ 为估价系数，假设服从区间为(–0.5, 0.5)的均匀分布。

(2) 汽车选择决策

本文的汽车使用者是指已经拥有汽车和计划购买汽车的居民，主要考虑其在换购或购买汽车时对传统燃油汽车和新能源汽车的选择决策。根据假设 3，消费者购车选择以综合成本最小化为出发点，因此可以建立碳交易机制下的汽车消费者选择决策模型，如式(9)所示。

$$\min\ GC(u,t)=\sum_k D_k(u,t)\cdot GC_k(u,t)$$
$$\text{s.t.}\begin{cases} GC_k(u,t)=VC_k(u,t)+UC_k(u,t)+XC_k(u,t) \\ VC_k(u,t)=\dfrac{PV_k(u,t)}{\sum_{t=1}^{VL(u,t)}\left(\dfrac{1}{1+IR(t)}\right)} \\ UC_k(u,t)=UC_k{}^f(u,t)+UC_k{}^e(u,t) \\ UC_k{}^f(u,t)=VMT_k(u,t)\cdot FC_k(u,t)\cdot PF_k(u,t) \\ UC_k{}^e(u,t)=VMT_k(u,t)\cdot EC_k(u,t)\cdot PE_k(u,t)/RFE(t) \\ RFE(t)=1-DP(u,t)\cdot e^{-CI\times SNEV(t)} \\ XC_k(u,t)=\Delta CE(u,t)\cdot PCE(u,t) \\ CE_0(u,t)+\Delta CE(u,t)\geqslant VMT_k(u,t)\cdot FC_k(u,t)\cdot EF(u,t) \\ \sum_k D_k(u,t)=1 \\ D_k(u,t)=0\ \text{或}\ 1 \end{cases} \tag{9}$$

式中：$GC(u,t)$ 为该汽车使用者的年化综合用车成本；$D_k(u,t)$ 为 0~1 决策变量，k 代表汽车动力类型，默认 k=1 代表传统燃油汽车，k=2 代表插电式混合动力汽车，k=3 代表纯电动汽车；$GC_k(u,t)$ 为选择汽车 k 的年化综合用车成本，分别包括汽车购置成本 $VC_k(u,t)$、汽车使用成本 $UC_k(u,t)$ 以及碳交易成本 $XC_k(u,t)$。

汽车购置成本 $VC_k(u,t)$ 采用年均成本法[20]，对汽车一次性购买价格 $PV_k(u,t)$ 进行按年分摊，IR 表示市场利率，默认 $IR(u,t)\equiv 0.03$，$VL(u,t)$ 表示该汽车使用者购买汽车时的期望使用年限，假设服从泊松分布。由于个人的期望使用年限不同，不同汽车使用者对相同价格汽车的年化购置成本也可能不同。

汽车使用成本 $UC_k(u,t)$ 主要为燃料成本，根据汽车燃料类型，可分为汽油成本 $UC_k{}^f(u,t)$ 和电力成本 $UC_k{}^e(u,t)$。其中汽油成本与燃油汽车年度行驶里程 $VMT_k(u,t)$、油耗强度 $FC_k(u,t)$ 以及汽油燃料价格 $PF_k(u,t)$ 成正比。电力成本与新能源汽车年度行驶里程 $VMT_k(u,t)$、电耗强度 $EC_k(u,t)$ 以及电力价格 $PE_k(u,t)$ 成正比。此外，由于新能源汽车充换电并不如传统燃油汽车加油那样方便，电力成本还需要考虑充电基础设施的普及程度和充电时间的影响，因此参考 Schwoon 等[21]和 Shafiei 等[22]的研究，引入充电影响系数 $RFE(t)$，该系数与汽车使用者的驾驶模式 $DP(u,t)$、新能源汽车的市场份额 $SNEV(t)$以及充电基础设施发展水平 CI 有关。

碳交易成本 $XC_k(u,t)$ 为碳配额交易的支出或收入，与碳配额交易量 $\Delta CE(u,t)$ 和碳配额估价 $PCE(u,t)$成正比，若 $\Delta CE(u,t)>0$ 则碳成本为正，代表额外购买碳配额，若 $\Delta CE(u,t)<0$ 则碳成本为负，代表出售剩余的碳配额；最后汽车使用者的实际碳排放不得超过初始碳配额 $CE_0(u,t)$ 与交易碳配额 $\Delta CE(u,t)$ 之和。

(3) 行驶里程决策

行驶里程反映了汽车使用者的交通需求决策。已有大量研究[23-28]证明影响汽车使用者年度行驶里程的主要因素包括四大类：价格因素(燃料价格、税费)、车辆因素(汽车能耗强度、车龄、车型、车辆数)，家庭因素(家庭收入、家庭成员数量、儿童数量、退休人员数量、度假次数)和建成环境因素(居住地人口密度、工作地人口密度)。因此，可以通过回归模型建立汽车行驶里程与上述影响因素的关系，其中最常用的是对数线性模型[28]，可表示为

$$\begin{aligned}\ln(VMT)=\alpha_0+\alpha_1\ln(PF)+\alpha_2\ln(\widehat{FC})+\\ \alpha_3\ln(VAge)+\alpha_4\ln(HIncome)+\\ \alpha_5\ln(HSize)+\alpha_x\ln(X)+\varepsilon\end{aligned} \tag{10}$$

式中：VMT 为年度车公里数；PF 为燃料价格；$\widehat{FC}$ 为汽车综合能耗强度(含新能源汽车电能消耗转换的当量油耗)；$VAge$ 为汽车年龄；$HIncome$ 为家庭总收入；$HSize$ 为家庭成员数；X 为所有其他未列出的影响因素；α 为回归系数，可通过最小二乘法(OLS)估计得到；ε 为扰动项，代表上述变量未能解释的误差。

在道路交通碳交易机制下，汽车使用者进行交通活动时除了需要承担燃料价格，还需要支付相应的碳配额，因此碳配额的价格也将成为影响交通需求的重要价格因素之一。根据式(8)，不同的用户对碳配额的市场估值存在差异，如果估值高于指导价格的，则对价格因素产生正影响，如果估值低于指导价格的，则对价格因素产生负影响。为了统一量

纲，将碳配额价格乘以燃料碳排放因子，便可以与燃料价格进行叠加，因此上述回归模型可改写为

$$\begin{aligned}\ln(VMT)=&\alpha_0+\alpha_1\ln\left[PF+EF\cdot(PCE-PCE_0)\right]+\\&\alpha_2\ln(\widehat{FC})+\alpha_3\ln(VAge)+\\&\alpha_4\ln(HIncome)+\alpha_5\ln(HSize)+\\&\cdots+\alpha_x\ln(X)+\varepsilon\end{aligned}\tag{11}$$

对于任意的汽车使用者 u，都存在一组随时间和个体变化的变量：碳配额估值 $PCE(u,t)$、汽车综合能耗强度 $\widehat{FC}(u,t)$、燃料排放因子 $EF(u,t)$、车龄 $VAge(u,t)$、家庭收入 $HIncome(u,t)$、家庭成员数量 $HSize(u,t)$，因此其汽车年度行驶里程 $VMT(u,t)$可通过上述函数的指数转换进行计算。

(4) 碳配额交易决策

每个符合条件的汽车使用者都将获得相应的初始碳配额 $CE_0(u,t)$，基于履约考核要求，实际碳排放高于初始碳配额的汽车使用者将购买碳配额，而实际碳排放低于初始碳配额的汽车使用者将出售碳配额，其碳配额交易量决策函数为

$$\begin{aligned}\Delta CE(u,t)=&VMT(u,t)\cdot FC(u,t)\cdot\\&EF(u,t)-CE_0(u,t)\end{aligned}\tag{12}$$

式中：$\Delta CE(u,t)$ 为汽车使用者 u 在本年度的碳配额交易量；当 $\Delta CE(u,t)>0$ 时，汽车使用者 u 为碳配额买家；当 $\Delta CE(u,t)<0$ 时，汽车使用者 u 为碳配额卖家。

2.2.3 汽车生产企业决策行为分析

汽车生产企业在道路交通碳交易机制下的决策行为包括：能耗强度碳积分估价决策、汽车生产决策、汽车定价决策、能耗强度碳积分核算与交易。此外，汽车生产企业可通过销售汽车的行为与汽车使用者交互。

(1) 碳积分估价决策

与上文碳配额市场价格预估同理，碳积分的市场价格同样也作为一个传递信号，影响着汽车生产企业的各种行为决策。因此，首先汽车生产企业也需要对能耗强度碳积分的市场价格进行预估，以此作为其决策的依据。由于政府对于碳积分交易价格不设置指导价格，而是设定碳积分价格底线和 2 倍的惩罚价格，即对碳积分的市场价格限定了下限和上限，因此汽车生产企业对能耗强度碳积分市场价格的预估值可表示为

$$PCC^{FC}(m,t)=PCC^{FC}_{\min}(t)\times\left[1+\delta(m,t)\right]\tag{13}$$

式中：$PCC^{FC}(m,t)$ 为汽车生产企业 m 在本年度的能耗强度碳积分估价；$PCC^{FC}_{\min}(t)$ 为本年度能耗强度碳积分底线价格；$\delta(m,t)$ 为碳积分估价浮动系数，假设服从区间为(0, 1)的均匀分布。

(2) 汽车生产决策

由于不同的汽车生产企业发展规模、产品结构、技术储备等差异，导致其降低能耗强度的边际成本也高低不齐。而从经济理性行为的角度，所有企业都将选择对自己成本最低的履约方式。边际成本小于碳积分估价的企业将选择通过技术升级达到履约目标，边际成本大于碳积分估价的企业则通过碳交易购买正积分进行抵偿。

传统燃油汽车生产企业将基于上一年度企业平均汽车能耗强度，调整本年度传统燃油汽车生产决策，如果上一年度的企业平均汽车能耗强度大于行业基准能耗强度，则需要考虑是否对传统燃油汽车进行节能技术升级，即降低传统燃油汽车的能耗强度，其决策模型可表示为

$$FC_1(m,t)=\begin{cases}FC_1(m,t)\cdot\left[1-R^{FC}(m,t)\right],\\\quad\text{if }\ \overline{FC}(m,t-1)>FC^b(t)\ \ \&\\\qquad MC^{FC}(m,t)<PCC^{FC}(m,t)\\FC_1(m,t-1),\qquad\text{if else}\end{cases}\tag{14}$$

式中：$FC_1(m,t)$ 为汽车生产企业 m 在本年度生产的传统燃油汽车的能耗强度；$\overline{FC}(m,t-1)$ 为上一年度的企业平均汽车能耗强度；$FC^b(t)$ 为该车型的行业基准能耗强度；$R^{FC}(m,t)$ 为汽车生产企业 m 在本年度的传统燃油汽车能耗强度下降比例；$MC^{FC}(m,t)$ 为汽车生产企业 m 在本年度降低能耗强度的边际成本。

同理，新能源汽车生产企业也将基于上一年度企业平均汽车能耗强度，调整本度新能源汽车生产决策，如果上一年度的企业平均汽车能耗强度大于行业基准能耗强度，则需要考虑是否扩大新能源汽

车生产规模，其决策模型可表示为

$$N_k(m,t)=\begin{cases}N_k(m,t-1)\cdot\left[1+S^{NEV}(m,t)\right],\\ \quad \text{if } \overline{FC}(m,t-1)>FC^b(t)\ \ \&\\ \quad\quad MC^{NEV}(m,t)<PCC^{FC}(m,t)\\ N_k(m,t-1),\quad \text{if else}\end{cases}\tag{15}$$

式中：$N_k(m,t)$ 为汽车生产企业 m 在本年度生产的新能源汽车数量(k=2,3)；$\overline{FC}(m,t-1)$ 为上一年度的企业平均汽车能耗强度；$FC^b(t)$ 为该车型的行业基准能耗强度；$S^{NEV}(m,t)$ 为汽车生产企业 m 在本年度的新能源汽车增产比例；$MC^{NEV}(m,t)$ 为汽车生产企业 m 在本年度增产新能源汽车的边际成本。

(3) 汽车定价决策

如果汽车生产企业在本年度决定对传统燃油气使用节能技术进行降低能耗强度，必然会在已有固定生产成本的基础上增加额外的研发和物资成本 $IC(m,t)$。此时，追逐利益最大化的汽车生产企业也必然会将这一部分增量成本通过对传统燃油汽车价格调整而转嫁给下游消费者。而如果汽车生产企业在本年度决定不降低传统燃油汽车能耗强度，并假设汽车市场供需关系保持稳定，企业将不对传统燃油汽车售价进行调整，即保持上一年度的价格。因此，汽车生产企业对传统燃油汽车定价的决策函数为

$$PV_1(m,t)=\begin{cases}PV_1(m,t-1)+IC(m,t)\cdot\eta^{FC},\\ \quad \text{if } FC_1(m,t)<FC_1(m,t-1)\\ PV_1(m,t-1),\ \text{if else}\end{cases}\tag{16}$$

式中：$PV_1(m,t)$ 为汽车生产企业 m 在本年度对其生产的传统燃油汽车的定价；η^{FC} 为燃油车技术升级成本转移系数，反映了汽车生产企业将增量成本转移到汽车售价的比例。

由于目前汽车市场份额上还是传统燃油汽车占主导地位，企业生产新能源汽车难以获得规模效益，且关键技术仍不成熟，导致新能源汽车的市场售价居高不下。而随着企业生产规模逐步扩大，生产技术和经验的积累使得新能源汽车单位生产成本降低，进而也将影响新能源汽车售价。因此可以使用技术学习(经验)曲线[29]表示单位产品生产成本与累计产量的关系，假设汽车生产企业根据其累计新能源汽车产量(销量)对新能源汽车定价进行调整，其决策函数为

$$PV_k(m,t)=PV_k(m,0)\cdot\left[\frac{CN_k(m,t)}{CN_k(m,0)}\right]^{-\rho_k}\tag{17}$$

式中：$PV_k(m,t)$ 为汽车生产企业 m 在年度本年度对其生产的新能源汽车 k 的定价(k=2,3)，$CN_k(m,t)$ 为汽车生产企业 m 截至本年度新能源汽车 k 的累计销量；ρ_k 为规模弹性系数。

(4) 碳积分交易决策

汽车生产企业在本年度结束后，将根据该年度各类型汽车的能耗强度和销量，自行核算企业平均能耗强度 $\overline{FC}(m,t)$ 与碳积分 $CC^{FC}(m,t)$，分别为

$$\overline{FC}(m,t)=\frac{\sum_k FC_k(m,t)\cdot N_k(m,t)}{\sum_k N_k(m,t)}\tag{18}$$

$$CC^{FC}(m,t)=\left[FC^b(t)-\overline{FC}(m,t)\right]\cdot\sum_k N_k(m,t)\tag{19}$$

根据汽车生产企业的履约考核要求，其中正积分可通过碳积分交易进行出售，负积分需要通过碳积分交易进行抵偿。为了追求利益最大，假设汽车生产企业将在交易期内把所有的碳积分用于交易。

2.2.4 燃料供应企业决策行为分析

燃料供应企业在道路交通碳交易下的决策行为包括：排放因子碳积分市场价格预估、燃料生产决策、燃料定价决策、排放因子碳积分核算与交易。此外，燃料供应企业可通过销售燃料的行为与汽车使用者交互。

(1) 碳积分估价决策

与汽车生产企业类似，燃料供应企业也需要对排放因子碳积分市场价格进行预估，以此作为其决策的依据，其预估值确定方法为

$$PCC^{EF}(p,t)=PCC^{EF}_{\min}(t)\cdot\left[1+\delta(p,t)\right]\tag{20}$$

式中：$PCC^{EF}(p,t)$ 为燃料供应企业 p 预估的本年度的排放因子碳积分价格；$PCC^{EF}_{\min}(t)$ 为本年度排放因子碳积分底线价格；$\delta(p,t)$ 为碳积分估价浮动系数，假设服从区间为(0, 1)的均匀分布。

(2) 燃料生产决策

根据假设 5，不同燃料供应企业生产的汽油含碳量不同，因此其燃料排放因子也不尽相同。燃料供应企业将基于上一年度企业平均排放因子与行业基准排放因子的差额，调整本年度生产决策，如果上一年度的企业平均排放因子大于行业基准排放因子，则需要考虑是否进行低碳燃料生产，进而降低燃料的排放因子。同理，碳积分估价大于边际成本的燃料供应企业将选择通过技术升级达到履约目标，否则通过碳交易购买正积分进行抵偿。因此，燃料供应企业对燃料排放因子的决策模型可表示为

$$EF(p,t)=\begin{cases}EF(p,t-1)\cdot\left[1-R^{EF}(p,t)\right], \\ \quad \text{if } EF(p,t-1)>EF^{b}(t)\ \& \\ \quad\quad MC^{EF}(p,t)<PCC^{EF}(p,t) \\ EF(p,t-1),\ \text{if else}\end{cases} \tag{21}$$

式中：$EF(p,t)$ 为燃料供应企业 p 在本年度生产的燃料排放因子；$EF^{b}(t)$ 为该车型的行业基准能耗强度；$R^{EF}(p,t)$ 为燃料供应企业 p 在本年度的燃料排放因子下降比例；$MC^{EF}(p,t)$ 为燃料供应企业 p 在本年度的边际减排成本，即企业每降低 1 个单位燃料排放因子(1 kg CO_2/L 汽油)所需要付出的成本。

(3) 燃料定价决策

由于汽油属于资源稀缺商品，其价格受国家的宏观调控，假设汽油的政府指导价格为 PF_0，企业可以根据燃料生产成本在一定幅度范围内自行定价。如果燃料供应企业在本年度决定使用低碳燃料降低排放因子，必然会在已有固定生产成本的基础上增加额外的研发和物资成本，进而导致一定程度的燃料价格上涨。因此，燃料供应企业对燃料定价的决策函数可表达为

$$PF(p,t)=PF(p,t-1)+MC^{EF}(p,t)\cdot EF(p,t-1)\cdot R^{EF}(p,t)\cdot\eta^{EF} \tag{22}$$

式中：$PF(p,t)$ 为燃料供应企业 p 在本年度对其生产的燃料的定价；η^{EF} 为燃料成本转移系数，反映了燃料供应企业将低碳燃料成本转移到燃料售价的比例。

(4) 碳积分交易决策

燃料供应企业在本年度结束后，将根据该年度燃料的排放因子和销量，自行核算企业的燃料排放因子碳积分 $CC^{EF}(p,t)$ 为

$$CC^{EF}(p,t)=\left[EF^{b}(t)-EF(p,t)\right]\cdot TFC(p,t) \tag{23}$$

式中：$TFC(p,t)$ 为燃料供应企业 p 在本年度出售的燃料总量。同理，假设燃料供应企业为了追求利益最大，将在交易期内把所有的碳积分用于交易。

2.3 基于多智能体的仿真模型

本文采用基于多智能体(Agent)的仿真平台——Netlogo，对道路交通碳交易机制下的各主体行为演化过程进行仿真模拟。Netlogo 通过海龟(Turtles)、海龟种类(Breeds)、瓦片(Patches)、链(Links)和观察者(Observer)等函数定义不同类别的 Agent，各类 Agent 可以通过例程定义特定的属性和行为，因此可根据上文描述的政府、汽车使用者、汽车生产企业、燃料供应企业的行为特征，分别设计其对应 Agent 的行动例程与决策变量。

基于 Netlogo 仿真平台和上述 Agent 行动例程，本文将构建由 1 个政府 Agent、200 000 个初始汽车使用者(居民) Agent，50 个汽车生产企业 Agent，121 个燃料供应企业 Agent 组成的道路交通碳交易仿真模型。仿真以 2017 年作为初始基准年(t=0)，从 2018 年开始运行仿真模型，每一年为一个仿真周期(履约周期)，直到 2050 年终止。为了尽可能还原真实世界人口的自然增长规律，模型设定在每个仿真周期末，汽车使用者 Agent 将以一定的死亡率随机死亡，同时以一定的出生率产生新的汽车使用者 Agent，而汽车生产企业和燃料供应企业 Agent 的数量默认不变。

仿真模型首先需要通过 Setup 函数对全局外部变量、各类 Agent 内部变量以及位置坐标等进行初始化，其中各变量的初始值来源于真实世界的实证数据。然后仿真模型通过 Go 函数启动，仿真的时间步长设定为 1 年，在每个仿真周期 t 内，所有

Agent 都将按照上述设定的行动例程各自运行，并实时更新 Agent 内部变量。本文设定汽车生产企业和燃料供应企业的位置固定不变，而汽车使用者 Agent 随着时间推移而随机移动，在购买汽车时选择距离最近的汽车生产企业，在购买燃料时选择所在瓦片上的燃料供应企业，进而模拟不同类 Agent 之间的交互行为。同类 Agent 之间的交互行为主要是通过相应的碳交易清算例程完成供需匹配。在下一仿真周期开始前，程序将自动更新仿真模型的所有变量并计算输出目标参数的值。基于此，仿真模型的总体运行流程如图 3 所示。

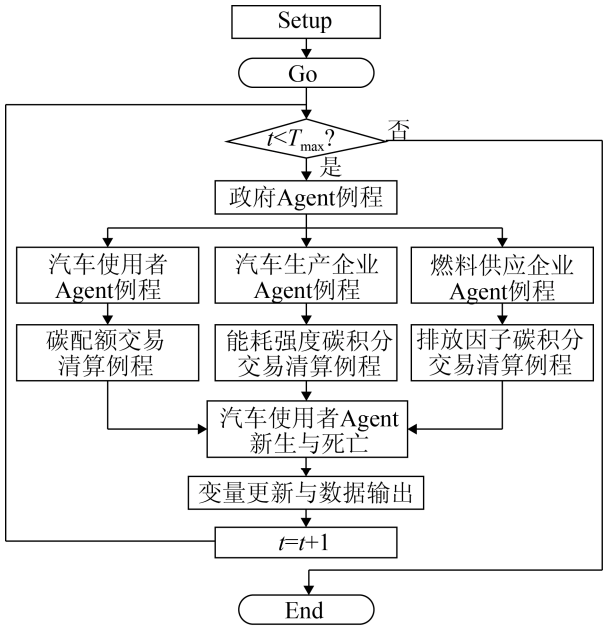


图 3 仿真模型运行流程
Fig. 3 Flow chart of simulation model

3 引入碳交易机制的新能源汽车市场发展路径对比

中国政府曾先后在多个政策文件提出了新能源汽车发展目标。《新能源汽车产业发展规划(2021－2035 年)》提出：“到 2025 年，新能源汽车新车销售量达到汽车新车销售总量的 20%左右，到 2035 年，纯电动汽车成为新销售车辆的主流。”《汽车产业中长期规划》中提出：“到 2025 年新能源汽车产销量达 500~700 万辆，占比超过 20%。”《节能与新能源汽车技术路线图》[30]中提出：“到 2025 年，纯电动汽车和插电式混合动力汽车年销售量占汽车总销量的 15%~20%，保有量超过 2 000 万辆；到 2030 年纯电动汽车和插电式混合动力汽车年销售量占汽车总销量的 40%~50%，保有量超过 8 000 万辆。”

为了实现国家新能源汽车的发展目标，本文引入道路交通碳交易机制以促进后补贴时代新能源汽车发展。根据上文的分析可知，道路交通碳交易机制下游政策参数为：碳配额下降率 RCE 、碳配额指导价格 PCE_0；中游政策参数为：能耗强度下降率 RCC^{FC} 、能耗强度碳积分底价 $PCC_{\min}^{FC}$ ；上游政策参数为：排放因子下降率 RCC^{EF} 、排放因子碳积分底价 $PCC_{\min}^{EF}$ ；充电政策参数为充电基础设施发展水平 CI。通过对上述 7 个政策参数进行组合设置，规划了 9 个新能源汽车发展路径，包括 1 个基准(BAU)路径，4 个单一发展路径：“上游(U)”路径、“中游(M)”路径、“下游(D)”路径、“充电(C)”路径，4 个组合发展路径：“上游+中游+充电(U+M+C)”路径、“上游+下游+充电(D+U+C)”路径、“下游+中游+充电(D+M+C)”路径、“上游+中游+下游+充电(D+M+U+C)”路径。各发展路径的政策参数设置如表 1 所示，字体加粗的参数是与基准路径取值不同的参数，其余为控制参数。相比基准路径，“上游(U)”路径、“中游(M)”路径、“下游(D)”路径、“充电(C)”路径分别在道路交通碳交易上游、中游、下游、充电政策参数上各增加 50%，而“上游+中游+充电(U+M+C)”路径、“上游+下游+充电(D+U+C)”路径、“下游+中游+充电(D+M+C)”路径、“上游+中游+下游+充电(D+M+U+C)”则是对以上 4 个单一发展路径的不同组合。

基于上文建立的道路交通碳交易多智能体仿真模型，分别对上述 9 个发展路径进行情景仿真，并使用 2017 年中国汽车实际销量和保有量对结果进行扩样与标定。结果表明，在所有发展路径中，2050 年中国汽车销量将达 4 000 万辆，保有量接近饱和值 5 亿辆左右，与大多数文献[31-34]的预测结果相近。因此，本文的仿真模型可以用于预测不同情

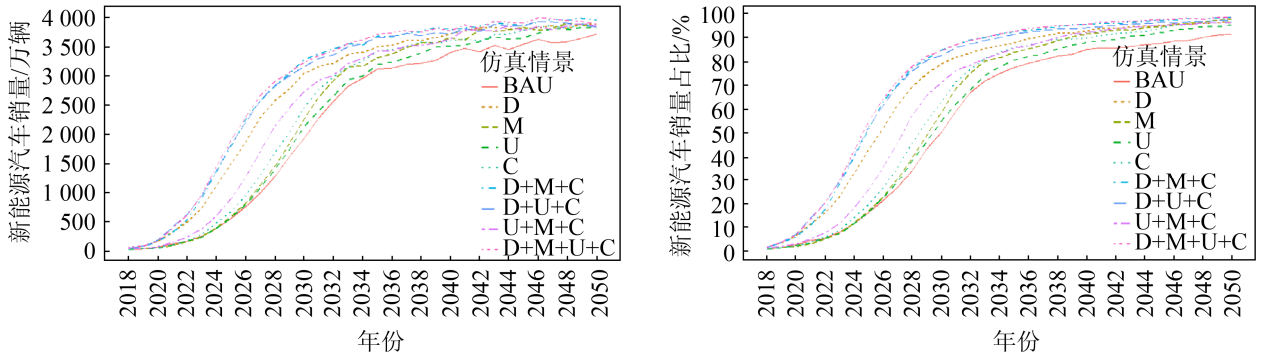
景下的中国新能源汽车市场发展趋势。

图 4~5 分别为 2018—2050 年不同发展路径下中国新能源汽车销量、保有量绝对值和占比预测。可见，本文规划的 9 个发展路径均经历了引入期、发展期、成熟期以及平稳期 4 个不同阶段，市场份额的增长速度先增后减，大约在 2025－2030 年左右增长最快，保有量在 2050 年左右接近饱和，符合“S 型”增长曲线，并且均实现了国家规划的新能源汽车发展目标。

表 1 发展路径政策参数设置

Tab. 1 Parameters setting of development paths

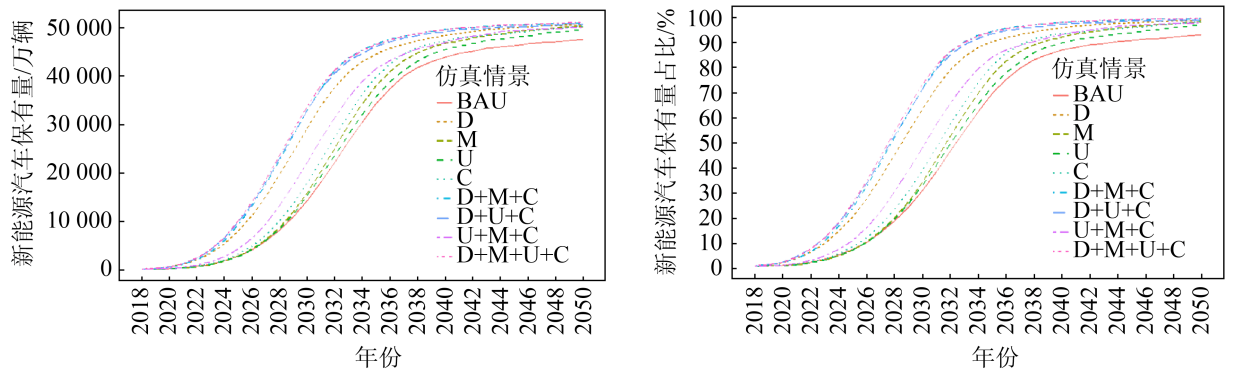
参数	发展路径								
	BAU	D	M	U	C	D+M+C	D+U+C	U+M+C	D+M+U+C
RCE/%	3	**4.5**	3	3	3	**4.5**	**4.5**	3	**4.5**
PCE_0/(元/kg)	3	**4.5**	3	3	3	**4.5**	**4.5**	3	**4.5**
RCC^{FC}/%	2	2	**3**	2	2	**3**	2	**3**	**3**
$PCC^{FC}_{\min}$ /(元/积分)	3 000	3 000	**4 500**	3 000	3 000	**4 500**	3 000	**4 500**	**4 500**
RCC^{EF}/%	1	1	1	**1.5**	1	1	**1.5**	**1.5**	**1.5**
$PCC^{EF}_{\min}$ /(元/积分)	3	3	3	**4.5**	3	3	**4.5**	**4.5**	**4.5**
CI(倍)	1	1	1	1	**1.5**	**1.5**	**1.5**	**1.5**	**1.5**



(a) 销量绝对值预测 (b) 销量占比预测

图 4 中国新能源汽车销量发展预测

Fig. 4 Forecast of new energy vehicle sales in China



(a) 保有量绝对值预测 (b) 保有量占比预测

图 5 中国新能源汽车保有量发展预测

Fig. 5 Forecast of new energy vehicle ownerships in China

在基准(BAU)路径下，新能源汽车发展与当前国家政策文件规划的目标相近：到 2030 年，中国新能源汽车销量可达 1 929 万辆，占比 50%，保有量可达 14 350 万辆，占比 31%；到 2050 年，中国新能源汽车销量可达 3 724 万辆，占比 91%，保有量可达 47 671 万辆，占比 93%。而其他 8 个路径与基准路径相比，分别对不同的政策参数进行了加强，因此均不同程度的超过了规划的发展目标。其中，“下游+中游+上游+充电(D+M+U+C)”组合路径下的新能源汽车发展最快：到 2030 年，中国新能源汽车销量可达 3 284 万辆，占比 85%，保有量可达 33 864 万辆，占比 73%；到 2050 年，中国新能源汽车销量可达 3 887 万辆，占比 98%，保有量可达 50 962 万辆，占比 99%。在 3 个单一发展路径中，“下游(D)”路径对新能源汽车的促进效率最高，甚至超过“上游+中游+充电(U+M+C)”组合发展路径。可见，相比于中游汽车生产企业和上游燃料供应企业，道路交通碳交易政策作用于下游汽车使用者对新能源汽车发展的影响效果更为显著。因此，为了发挥道路交通碳交易机制的最大效用，需要合理设置政策参数，从上游、中游、下游和基础设施 4 方面同时发力，进而实现新能源汽车跨越式发展。

4 结论

本文提出同时把燃料供应企业、汽车生产企业、汽车使用者作为道路交通碳交易的责任主体，设计了多主体协同的道路交通碳交易机制，解析了各责任主体的行为机理，分析了道路交通碳交易影响新能源汽车市场发展的关键政策参数，最后通过多智能体仿真对比评估了 9 个引入碳交易机制的新能源汽车发展路径，主要结论如下：

(1) 多主体协同的道路交通碳交易机制通过影响上游燃料供应企业、中游汽车生产企业、下游汽车使用者等多类异质责任主体的决策行为，可以同时从供给侧和需求侧两端发力，促进新能源汽车的生产与消费。

(2) 碳交易机制影响新能源汽车市场发展的关键政策参数主要包括：碳配额下降率、碳配额指导价格、能耗强度下降率、能耗强度碳积分底价、排放因子下降率、排放因子碳积分底价、充电基础设施发展水平。

(3) 通过引入道路交通碳交易机制，可以有效接力新能源汽车补贴政策的退坡，形成市场化激励与惩罚机制，建立起燃油汽车反哺新能源汽车的市场机制，促进后补贴时代新能源汽车的快速发展。

需要注意的是，由于道路交通碳交易机制的复杂性，本文建立的仿真模型是基于很多假设条件与简化，在数据可获得和操作可行的情况下，后续研究需要逐渐放宽假设条件，进一步完善和验证仿真模型，尽可能还原真实世界的运行。此外，未来研究还可结合国家已有的道路交通节能减排和新能源汽车推广政策，进一步分析道路交通碳交易与不同政策组合的交互影响。

参考文献：

[1] 袁博. 后补贴时代中国新能源汽车产业发展研究[J]. 区域经济评论, 2020(3): 58-64.
Yuan Bo. Research on the Development of China’s New Energy Vehicle Industry in the Post Subsidy Era[J]. Regional Economic Review, 2020(3): 58-64.

[2] 李晔, 李文翔, 魏愚奏. 道路交通碳排放权交易研究现状与展望[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(4): 465-471.
Li Ye, Li Wenxiang, Wei Yuao. Research Status and Prospect of Carbon Emission Trading in Road Traffic[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2018, 46(4): 465-471

[3] Li Y, Li W, Wei Y, et al. Using Personal Carbon Dioxide Trading to Promote Cleaner Cars[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport (S0965-092X), 2016, 170(2): 86-98.

[4] 钟永光, 贾晓菁, 钱颖. 系统动力学[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2013.
Zhong Yongguang, Jia Xiaojing, Qian Ying. System Dynamics[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2013.

[5] 廖守亿, 陈坚, 陆宏伟, 等. 基于 Agent 的建模与仿真概述[J]. 计算机仿真, 2008, 25(12): 1-7.
Liao Shouyi, Chen Jian, Lu Hongwei, et al. Overview of Agent-based Modeling and Simulation[J]. Computer Simulation, 2008, 25(12): 1-7.

[6] Keles D, Wietschel M, Most D, et al. Market Penetration of Fuel Cell Vehicles-Analysis based on Agent Behaviour[J]. International Journal of Hydrogen Energy (S0360-3199), 2008, 33(16): 4444-4455.

[7] Park S Y, Kim J W, Lee D H. Development of a Market Penetration Forecasting Model for Hydrogen Fuel Cell Vehicles Considering Infrastructure and Cost Reduction Effects[J]. Energy Policy (S0301-4215), 2011, 39(6): 3307-3315.

[8] Wang N, Tang L, Zhang W, et al. How to Face the Challenges Caused by the Abolishment of Subsidies for Electric Vehicles in China?[J]. Energy (S0360-5442), 2019, 166: 359-372.

[9] Liu D, Xiao B. Exploring the Development of Electric Vehicles under Policy Incentives: A Scenario-based System Dynamics Model[J]. Energy Policy (S0301-4215). 2018, 120: 8-23.

[10] 王浩淞. 基于碳减排的新能源汽车应用推广模式研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017: 27-47.
Wang Haosong. Research on the Application and Promotion Model of New Energy Vehicles Based on Carbon Emission Reduction[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017: 27-47.

[11] 姚志超. 新能源汽车扩散模型的仿真研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015: 8-20.
Yao Zhichao. Simulation Study on Diffusion Model of New Energy Vehicles[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015: 8-20.

[12] 胡剑. 基于 Agent 的多类新能源汽车扩散模型及仿真研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2013: 9-21.
Hu Jian. Agent-based Diffusion Model and Simulation of Multi-class New Energy Vehicles[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2013: 9-21.

[13] Schwoon M. Simulating the Adoption of Fuel Cell Vehicles[J]. Journal of Evolutionary Economics (S1432-1386), 2006, 16(4): 435-472.

[14] Shafiei E, Thorkelsson H, Ásgeirsson E I, et al. An Agent-based Modeling Approach to Predict the Evolution of Market Share of Electric Vehicles: A Case Study from Iceland[J]. Technological Forecasting and Social Change (S0040-1625), 2012, 79(9): 1638-1653.

[15] Noori M, Tatari O. Development of an Agent-based Model for Regional Market Penetration Projections of Electric Vehicles in the United States[J]. Energy (S0360-5442), 2016, 96: 215-230.

[16] Zhuge C, Wei B, Dong C, et al. Exploring the Future Electric Vehicle Market and its Impacts with an Agent-based Spatial Integrated Framework: A Case Study of Beijing, China[J]. Journal of Cleaner Production (S0959-6526), 2019, 221: 710-737.

[17] 严筱. 低碳交通背景下中国新能源汽车的市场扩散研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2016.
Yan Xiao. Research on Market Diffusion of New Energy Vehicles in China under the Background of Low-carbon Transportation[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2016.

[18] 赵倩倩. 基于 Agent 的新能源汽车市场扩散建模及仿真[J]. 综合运输, 2019, 41(10): 107-112.
Zhao Qianqian. An Agent-Based Diffusion Modeling and Simulation of New Energy Vehicle Market[J]. China Transportation Review, 2019, 41(10): 107-112.

[19] 詹文杰, 邵原. 连续竞价市场的交易策略研究综述[J]. 管理学报, 2008(6): 921-927.
Zhan Wenjie, Shao Yuan. A Summary of the Research on Trading Strategies in Continuous Bidding Market[J]. Journal of Management, 2008(6): 921-927.

[20] 李军. 个人交通碳排放权交易机制对交通领域碳减排的影响研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
Li Jun. Research on the Impact of Individual Transportation Carbon Emission Trading Mechanism on Carbon Emission Reduction in Transportation Field[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.

[21] Schwoon M. Simulating the Adoption of Fuel Cell Vehicles[J]. Journal of Evolutionary Economics (S1432-1386), 2006, 16(4): 435-472.

[22] Shafiei E, Thorkelsson H, Ásgeirsson E I, et al. An Agent-based Modeling Approach to Predict the Evolution of Market Share of Electric Vehicles: A Case Study from Iceland[J]. Technological Forecasting and Social Change (S0040-1625), 2012, 79(9): 1638-1653.

[23] Jochem P. A CO_2 Emission Trading Scheme for German Road Transport: Assessing the Impacts using a Meso Economic Model with Multi-agent Attributes[D]. Baden-Baden, Germany: Universität Karlsruhe (TH), 2009.

[24] Frondel M, Peters J, Vance C. Identifying the Rebound - Evidence from a German Household Panel[R]. Ruhr Economic Paper, 2007.

[25] Wang T, Chen C. Impact of Fuel Price on Vehicle Miles Traveled (VMT): do the Poor Respond in the Same Way as the Rich?[J]. Transportation (S1572-9435), 2014, 41(1): 91-105.

[26] Newmark G L, Haas P M. Income, Location Efficiency,

and VMT: Affordable Housing as a Climate Strategy[R]. Housing California, 2015.

[27] Liddle B. Long-run Relationship among Transport Demand, Income, and Gasoline Price for the US[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment (S1361-9209), 2009, 14(2): 73-82.

[28] Wadud Z. Personal Tradable Carbon Permits for Road Transport: Heterogeneity of Demand Responses and Distributional Analysis[D]. London: Imperial College London, 2007.

[29] Weiss M, Patel M K, Junginger M, et al. On the Electrification of Road Transport - Learning Rates and Price Forecasts for Hybrid-Electric and Battery-Electric Vehicles[J]. Energy Policy (S0301-4215), 2012, 48: 374-393.

[30] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
China Automotive Engineering Society. Technical Roadmap for Energy Saving and New Energy Vehicles [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2016.

[31] Huo H, Wang M. Modeling Future Vehicle Sales and Stock in China[J]. Energy Policy (S0301-4215), 2012, 43: 17-29.

[32] Huo H, Wang M, Johnson L, et al. Projection of Chinese Motor Vehicle Growth, Oil Demand, and CO_2 Emissions Through 2050[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (S0361-1981), 2007(1): 69-77.

[33] Hao H, Wang H, Ouyang M, et al. Vehicle Survival Patterns in China[J]. Science China Technological Sciences (S1869-1900), 2011, 54(3): 625-629.

[34] Ou X, Zhang X, Chang S. Scenario Analysis on Alternative Fuel/Vehicle for China's Future Road Transport: Life-cycle Energy Demand and GHG Emissions[J]. Energy Policy (S0301-4215), 2010, 38(8): 3943-3956.