

# 政府-企业-居民协同共治的道路交通碳交易机制

李文翔<sup>1</sup>,李 晔<sup>2\*</sup>,蔡近近<sup>1</sup> (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:** 根据道路交通碳排放的影响机理,提出同时把上游燃料供应企业、中游汽车生产企业、下游汽车使用者同时作为道路交通碳交易的责任主体,设计了政府-企业-居民协同共治的道路交通碳交易机制,包括碳配额总量设定、初始碳配额分配、行业基准设定、履约考核、市场交易以及监测报告核查等制度.通过案例与情景分析揭示了道路交通碳交易的多主体协同作用机理:在政府对于碳配额总量和行业基准的调控下,燃料供应企业将通过改变燃料成分来降低燃料排放因子;汽车生产企业将通过提高汽车燃油经济性和新能源汽车比例来降低汽车能耗强度;汽车使用者将通过减少车辆行驶里程降低交通需求或者购买使用新能源汽车.本文所提出的政府-企业-居民协同共治的道路交通碳交易机制,可以分别从上游、中游、下游促进道路交通碳排放的3个关键影响因素——燃料排放因子、汽车能耗强度、交通活动需求协同优化,能够有效控制道路交通温室气体排放增长,进而加速“碳达峰”的实现和“碳中和”的转型.

**关键词:** 碳中和; 道路交通; 碳交易机制; 主体协同; 碳配额

**中图分类号:** X32.022 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2021)09-4426-13

## The CO<sub>2</sub> emission trading system for road transport collaboratively governed by the government, enterprises, and residents.

LI Wen-xiang<sup>1</sup>, LI Ye<sup>2\*</sup>, CAI Jin-jin<sup>1</sup> (1.Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2.College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China). *China Environmental Science*, 2021,41(9): 4426-4438

**Abstract:** This study designed an emission trading system for road transport (ETS-RT) which is collaboratively governed by the government, enterprises, and residents. In the ETS-RT, the upstream fuel producers, midstream vehicle manufacturers, and downstream vehicle users are all involved as regulated entities. The scheme of the ETS-RT includes cap and allocation of the carbon quota, setting of industry benchmarks, examining of compliance, trading of carbon quota, monitoring, reporting, and verification (MRV) of carbon emission. Through case and scenario analysis, the multi-agent collaboration mechanism of the ETS-RT was revealed: under the government's regulation on carbon quota and industry benchmark, fuel producers change the fuel composition to reduce the emission factor of automotive fuels, vehicle manufacturers improve the fuel economy and increase the production of new energy vehicles to reduce the energy consumption intensity of vehicles, while vehicle users decrease the annual vehicle miles to reduce the travel demand or choose the new energy vehicles. The proposed ETS-RT can promote the collaborative optimization of fuel emission factors, vehicle energy intensities, and traffic activity demand, which are the key influencing factors of the road transport CO<sub>2</sub> emissions. As a result, it can effectively control the growth of greenhouse gas emissions from road transport, thereby accelerating the achievement of "CO<sub>2</sub> emissions peak" and the transition to "carbon neutrality".

**Key words:** carbon neutral; road transport; CO<sub>2</sub> emission trading system; multi-agent collaboration; carbon quota

为了应对全球气候变化,我国在国际社会宣布:力争2030年前实现“碳达峰”、2060年前实现“碳中和”.我国交通部门碳排放量占全国碳排放总量的10%左右<sup>[1]</sup>,是第三大温室气体排放部门,仅次于能源供应和工业生产部门,也是近二十年来能源消耗增长最快的部门.其中,道路交通碳排放占据了交通部门碳排放的80%以上<sup>[1]</sup>,已经成为“碳中和”的重点关注领域.然而,由于道路交通减排涉及上、中、下游多类相互影响的异质责任主体,导致现有针对单一主体的减排措施大多存在不确定性和反弹效应等问题<sup>[2]</sup>,因此如何有效控制道路交通碳排放增长成为亟待解决的难题.

碳交易作为一种缓解气候变化的市场化减排机制,通过控制碳排放总量,并允许碳配额交易,为排放主体提供了灵活的履约方式,可以降低全社会减排成本,帮助国家更确定、更高效、更经济地实现既定减排目标<sup>[3]</sup>.近日中国发布的《“十四五规划”和2035年远景目标纲要》明确表明:推动全国碳交易市场建设是实现“碳达峰、碳中和(双碳)”目标的有效抓手与重要保障.我国碳交易市场经过10年试

收稿日期: 2021-01-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52002244,71774118);上海市哲学社会科学规划青年课题(2020EGL019);上海市浦江人才计划项目(2020PJC083);上海市晨光计划项目(20CG55)

\* 责任作者, 教授, jamesli@tongji.edu.cn

点省市的建设,直至 2021 年 1 月 5 日,生态环境部发布《碳排放权交易管理办法(试行)》,标志着全国碳交易市场正式启动。

然而,当前碳交易市场的覆盖范围主要包括数据统计基础较好的、减排潜力较大的固定排放源及大型企业。由于移动排放源的复杂性与分散性,交通碳排放监测与管理难度较大<sup>[4]</sup>,目前国际上绝大多数碳交易体系都还未曾包括碳排放增长最快的道路交通部门<sup>[5]</sup>。但随着 5G、大数据、云计算、区块链、物联网等前沿技术的快速发展,将实现道路交通碳排放可追溯、可测量、可交易与不可篡改<sup>[6]</sup>,因此未来有望将道路交通部门纳入碳交易市场<sup>[7]</sup>。

国内外学者对于道路交通碳交易机制已经开展了广泛的理论与探索<sup>[4,8-11]</sup>。根据责任主体不同,道路交通碳交易主要可分为 3 种机制<sup>[12]</sup>:①以燃料供应企业为责任主体的上游机制;②以汽车生产企业为责任主体的中游机制;③以汽车使用者为责任主体的下游机制。然而,上述 3 种道路交通碳交易机制由于作用机理不同,都存在各自的优势与不足<sup>[3]</sup>:上游机制主要作用于数量较少的燃料供应企业,促进其改变燃料成分以降低碳排放因子,覆盖范围广,但减排激励较弱<sup>[13]</sup>;中游机制主要作用于大型汽车生产企业,促进其提高汽车燃油经济性以降低汽车能耗强度,管理成本较低,但只能覆盖新车<sup>[14]</sup>;下游机制主要作用于汽车使用者,促进其减少交通活动需求以降低车辆行驶里程,减排激励强,但管理成本较高<sup>[15-17]</sup>。可见,已有的 3 种道路交通碳交易机制都仅仅只作用于单一责任主体,并分别影响道路交通碳排放的三个关键因素<sup>[19]</sup>,即:燃料排放因子、汽车能耗强度、交通活动需求<sup>[20]</sup>,未能实现三者的协同优化,因此无法发挥最大减排效率。

综上,“碳中和”是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革,需要政府、企业、居民共同努力、协同发力,碳交易机制正是推动这一变革的重要力量。然而不同于其他固定排放部门,道路交通部门由于其特殊性与分散性,道路交通碳交易的管理范围、参与主体、配额分配、核算方法等制度设计还有待深入研究与完善。因此,有必要建立政府-企业-居民协同共治的道路交通碳交易机制,以加速“双碳”目标的实现,对于实现我国应对气候变化承诺、提高我国国际竞争力、推进全球气候治理具有重要意义。

## 1 机制机理分析

道路交通碳排放涉及的行业和责任主体众多:下游汽车使用者(包括使用私人小汽车出行的居民与运输企业)作为终端排放源,产生交通活动,对道路交通碳排放负有最直接责任;中游汽车生产企业(包括传统燃油汽车与新能源汽车生产企业)向消费者出售具有不同能耗强度的汽车产品,对道路交通碳排放负有间接责任;上游燃料供应企业(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)向汽车使用者出售不同排放因子的汽车燃料,其燃烧为汽车提供动力时将直接产生碳排放,对道路交通碳排放也负有间接责任。因此,本文提出同时将燃料供应企业、汽车生产企业、汽车使用者作为道路交通碳排放的责任主体,建立一种由两级市场构成、多主体协同的道路交通碳交易机制,其基本架构如图 1 所示。

一级市场主要由政府主导,负责碳配额的分配和履约考核。在履约初期,政府根据年度减排目标确定道路交通领域的碳排放总量,并按照预先设定的规则针对下游的汽车使用者分配初始碳配额,针对中游汽车生产企业设定行业基准能耗强度,针对上游燃料供应企业设定行业基准排放因子。在履约末期,政府分别对汽车使用者的碳排放配额、汽车生产企业的汽车能耗积分、燃料供应企业的排放因子积分进行考核评估以及采取必要惩罚。二级市场主要由市场主导,不同责任主体为了履约,将分别根据各自边际减排成本选择最经济的减排策略。减排成本低的责任主体将选择主动减排,并通过碳交易出售剩余的碳积分或碳配额实现利益最大化。而减排成本高的责任主体则将选择通过碳交易购买碳积分或碳配额,实现履约成本最小化。

在上述道路交通碳交易机制作用下,将激励各类责任主体投资或创新低碳技术,例如:燃料供应企业可通过改变燃料成分或生产可再生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辆行驶里程降低交通需求或购买新能源汽车。此外,碳交易市场的价格信号还将对不同类型的责任主体产生交互影响与协同效应,例如:碳交易市场价格越高,将引导更多的汽车

使用者选择低排放汽车,进而将刺激汽车生产企业制造更多新能源汽车<sup>[21]</sup>,同时倒逼燃料供应企业生产更加低碳的燃料.因此,本文所提出的道路交通碳交易机制通过政府、企业、居民多类责任主体的协

同共治,可以同时促进道路交通碳排放三大影响因素:燃料排放因子、车辆能耗强度、交通活动需求的优化,推进道路交通行业从上游、中游、下游全面低碳转型发展.

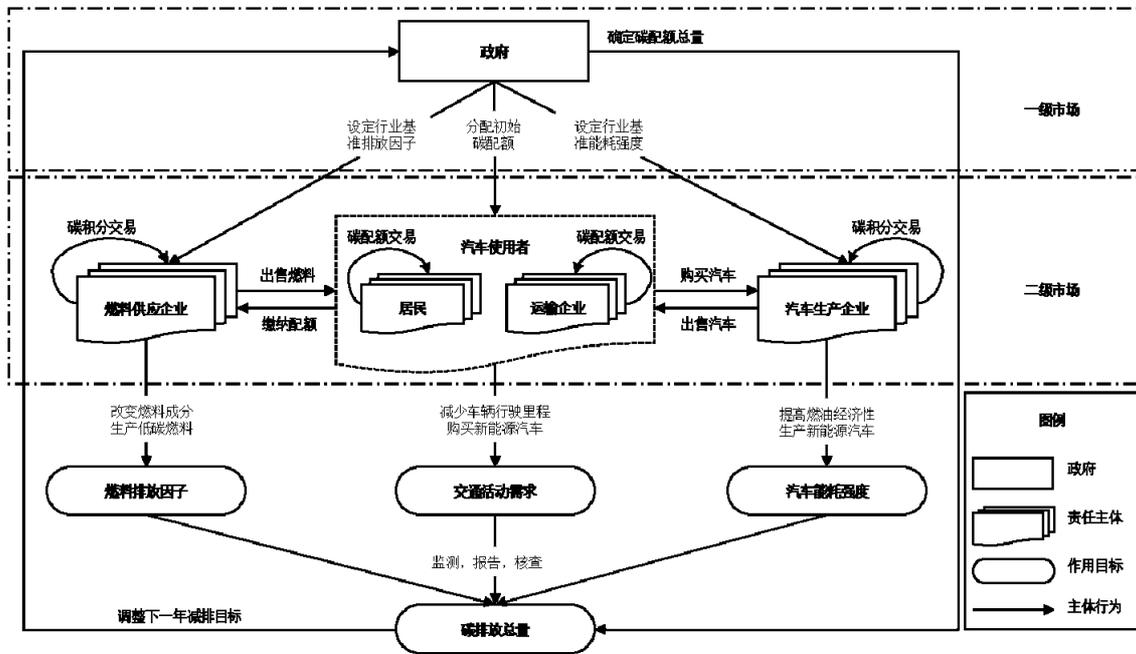


图 1 政府-企业-居民协同共治的道路交通碳交易基本架构

Fig.1 Basic framework of the CO<sub>2</sub> emission trading system for road transport collaboratively governed by the government, enterprises, and residents

## 2 政策制度设计

根据已有碳交易基础理论与实践经验,将从碳配额总量设定、初始碳配额分配、行业基准设定、履约考核、市场交易以及监测报告核查等方面设计多主体协同的道路交通碳交易制度.

### 2.1 碳配额总量设定制度

目前碳配额总量的设定有两种不同的方式:绝对总量减排目标和相对强度减排目标.绝对总量减排目标实质上是碳排放总量控制的一种“硬约束”,明确规定碳排放总量下降至目标的比例.而对于相对强度减排目标,在履约期间碳排放总量还是可以继续上升,关键是通过排放增量和增速的约束,实现相对于正常情景的额外减排量,并最终实现对碳排放总量的控制.强度减排目标是向总量控制目标的过渡阶段,可给予经济充分调整的时间<sup>[22]</sup>.考虑到人民生活水平日益提高,中国的汽车保有量也将持续保持增长态势.因此本文建议在道路交通碳交易

建设初期采用相对强度减排目标,并将道路交通碳配额总量设定分为两部分,一部分是已有汽车的碳配额,一部分是新增汽车的碳配额<sup>[23]</sup>.

2.1.1 已有汽车的碳配额总量设定 碳配额总量设定往往需要核算历史上某段时期道路交通的碳排放,以此作为参考基准.根据《IPCC 国家温室气体清单指南 2006》<sup>[24]</sup>,移动排放源碳排放核算方法可分为两大类:方法一是自上而下,基于汽车燃料消耗的统计数据计算碳排放总量;方法二是自下而上,基于交通活动水平数据计算碳排放总量.本文主要采用后者,该方法基本步骤为:确定汽车类型,收集各类型汽车保有量、行驶里程、单位里程能耗强度等数据,进而推算出燃料消耗量,再结合燃料排放因子进行计算.为了便于统计和计算,同类型汽车的行驶里程和能耗强度往往取平均值,如式(1).

$$TCE_i^e(t-1) = \sum_k NV_i^e(t-1) \times \overline{VMT}_i^e(t-1) \times \overline{FC}_{ik}^e(t-1) \times \overline{EF}_k^e(t-1) \quad (1)$$

式中:上标 e 代表已有汽车;下标  $i$  为汽车类型;下标  $k$  为燃料类型; $t$  为时间变量; $TCE_i^e(t-1)$  为基准年已有汽车  $i$  的碳排放总量; $NV_i^e(t-1)$  为基准年已有汽车  $i$  的保有量; $\overline{VMT}_i^e(t-1)$  为基准年已有汽车  $i$  的平均行驶里程; $\overline{FC}_k^e(t-1)$  为基准年已有汽车  $i$  单位里程消耗燃料  $k$  的平均值; $\overline{EF}_k^e(t-1)$  为基准年燃料  $k$  的平均排放因子。

由于采用相对强度减排目标,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),计算已有汽车目标年的基准碳排放强度,如式(2)。并根据目标年的各车型已有汽车的数量,可以计算目标年的碳配额总量,如式(3)。

$$BC_i^e(t) = \frac{TCE_i^e(t-1)}{NV_i^e(t-1)} \times [1 - R_i^e(t)] \quad (2)$$

$$CAP^e(t) = \sum_i BC_i^e(t) \times NV_i^e(t) \quad (3)$$

式中: $BC_i^e(t)$  为目标年已有汽车  $i$  的基准碳排放强度; $R_i^e(t)$  为目标年已有汽车  $i$  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; $CAP^e(t)$  为目标年已有汽车的碳排放总量设定值; $NV_i^e(t)$  为目标年已有汽车  $i$  的数量(需要考虑上一年汽车报废的比例)。

**2.1.2 新增汽车的碳配额总量设定** 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(例如:可再生能源、氢能),往往具有更大的减排潜力,并且新能源汽车的碳排放显著低于燃油汽车。为了促进新增汽车中新能源汽车的推广,同时倒逼企业不断改进和创新技术,生产出更加低碳的汽车和燃料,因此政府设定的新增汽车碳配额下降率应该大于已有汽车碳配额下降率。对于不同车型的新增汽车,其基准碳排放强度计算如下:

$$BC_i^n(t) = \frac{TCE_i^e(t-1)}{NV_i^e(t-1)} \times [1 - R_i^n(t)] \quad (4)$$

式中:上标 n 表示新增汽车; $BC_i^n(t)$  为目标年新增汽车  $i$  的基准碳排放强度; $R_i^n(t)$  为目标年新增汽车  $i$  的碳配额下降率;通常  $R_i^n(t) > R_i^e(t)$ 。

对于目标年新增汽车的数量可以由政府根据历年各类型汽车新注册数量或销量的变化趋势进行预测,并结合政府对汽车数量调控的政策最终确定允许的新增汽车数量。常用的汽车销量预测模型可分为时间序列模型(例如:移动平均法、指数平滑

法、ARIMA 模型、灰色模型等)和因果关系模型(Logistic 回归模型、Compertz 回归模型、指数回归模型、神经网络等)<sup>[25]</sup>。由于汽车新注册量受到各种因素综合影响,难以判断影响其需求的主要因素,具有一定的随机波动性。因此本文采用需要数据信息较少的灰色模型马尔科夫模型<sup>[26]</sup>预测目标年度的新增汽车  $i$  的数量  $NV_i^n(t)$ ,进而根据设定的基准排放强度可计算新增汽车的碳配额总量,如式(5)。

$$CAP^n(t) = \sum_i BC_i^n(t) \times NV_i^n(t) \quad (5)$$

式中: $CAP^n(t)$  为今年新增汽车的碳排放总量设定值; $NV_i^n(t)$  为目标年新增汽车  $i$  的数量。

## 2.2 初始碳配额分配制度

初始碳配额分配制度是根据所设定的碳配额总量目标,为每一个被纳入碳交易体系且符合条件的责任主体分配其可以使用的初始碳配额<sup>[27]</sup>。常用的初始碳配额分配方法可分为免费分配法和有偿分配法<sup>[28]</sup>。其中免费分配法可分为历史数据法(又称祖父制)和基准线法(又称标杆法)。有偿分配法包括固定价格出售法和拍卖法等。

在碳交易机制的建立和实施进程中,碳配额分配方法也是不断进化的。在碳交易建设初期,一般以免费分配的方法为主,以获得大部分责任主体的支持。在碳交易开展过程中,将逐渐过渡到以免费分配和有偿分配相结合的方法,即一部分配额采用基准线法免费分配,剩余部分采用固定价格出售或拍卖的方式进行分配。在未来碳交易成熟阶段,一般采用效率最高的拍卖法进行碳配额分配。

在本文建立的多主体协同的道路交通碳交易体系中,碳配额的持有者为下游汽车使用者,主要包括直接拥有并使用小汽车的居民和运输企业。对于使用公交、出租车或其他公共交通方式的无车居民不分配初始碳配额,其碳排放从相应运输企业的碳配额中扣减。由于参与主体众多,为了保证公平分配与提高参与积极性,本文提出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,将该车型相应的碳配额发放到对应汽车的碳账户,汽车所有人(或企业)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已

有汽车数量和新增汽车数量决定,如式(6).

$$CE_0(u,t) = \sum_i BC_i^e(t) \times NV_i^e(u,t) + \sum_i BC_i^n(t) \times NV_i^n(u,t) \quad (6)$$

式中: $u$  代表任意汽车使用者(包括居民和运输企业); $CE_0(u,t)$  为汽车使用者  $u$  在目标年的碳初始配额; $NV_i^e(u,t)$  为汽车使用者  $u$  在目标年所拥有的已有汽车  $i$  的数量; $NV_i^n(u,t)$  为汽车使用者  $u$  在目标年新增汽车  $i$  的数量.

### 2.3 行业基准设定制度

**2.3.1 行业基准能耗强度设定** 对于汽车生产企业,由于其不是道路交通碳排放的直接产生者,而是向下游消费者提供了产生排放的产品,因此不对其进行碳排放总量的控制.为了驱动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基准年的平均能耗强度,设定目标年汽车能耗强度的下降率和目标值,即行业基准能耗强度.通常汽车类型按整车整备质量进行划分,例如,载客汽车可分为大型、中型、小型、微型,载货汽车可分为重型、中型、轻型、微型.则在目标年车型  $i$  汽车的行业基准能耗强度可表示为  $FC_i^b(t)$ ,如式(7).

$$FC_i^b(t) = \overline{FC}_i(t-1) \times [1 - R^{FC}(t)] \quad (7)$$

式中: $\overline{FC}_i(t-1)$  为车型  $i$  的所有汽车在基准年的实际平均能耗强度; $R^{FC}(t)$  为目标年汽车能耗强度的下降率.

**2.3.2 行业基准排放因子设定** 对于燃料供应企业,由于只是向下游出售汽车燃料,而不是燃料的消费者,同理也不对其进行碳排放总量的控制.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,进而降低燃料碳排放因子,政府应该根据不同类型燃料的减排潜力和基准年的平均排放因子,设定目标年排放因子的下降率和目标值,即行业基准排放因子.常见的燃料类型一般可分为:汽油、柴油、液化天然气、液化石油气、压缩天然气、甲醇等.则在目标年类型  $k$  燃料的行业基准排放因子可表示为  $EF_k^b(t)$ ,如式(8).

$$EF_k^b(t) = \overline{EF}_k(t-1) \times [1 - R^{EF}(t)] \quad (8)$$

式中: $\overline{EF}_k(t-1)$  为燃料  $k$  在基准年的实际平均排放因子; $R^{EF}(t)$  为目标年燃料排放因子的下降率.

### 2.4 履约考核制度

本文所建立的多主体协同的道路交通碳交易机制包含三类不同的履约主体:对于汽车使用者,主要考核该年度汽车使用过程中实际碳排放情况;对于汽车生产企业,主要考核该年度所销售汽车的平均能耗强度;对于燃料供应企业,主要考核该年度所销售燃料的平均碳排放因子.

**2.4.1 汽车使用者** 每个汽车使用者将获得一定的初始碳配额,在燃料供应企业购买燃料时除支付燃料费用,同时还必须支付相应的碳配额.当碳配额不足时,汽车使用者将面临两个选择:要么停止继续使用该汽车,要么通过碳交易向配额剩余的用户购买额外的配额.当配额剩余时,汽车使用者可以选择通过碳交易出售多余的碳配额以获取额外的减排收益.为了防止碳配额囤积导致市场价格不受控,本文规定不允许将剩余碳配额转结到下一年使用.因此,对于汽车使用者履约达标的条件为:实际碳排放不超过其初始碳配额与交易的碳配额之和,如式(9):

$$CE(u,t) \leq CE_0(u,t) + \Delta CE(u,t) \quad (9)$$

式中: $CE(u,t)$  为汽车使用者  $u$  在目标年内的实际碳排放量; $\Delta CE(u,t)$  为  $u$  在目标年内交易的碳配额数量;当购买碳配额时,  $\Delta CE(u,t) > 0$ ; 当出售碳配额时,  $\Delta CE(u,t) < 0$ . 对于每个汽车使用者实际碳排放的核算可根据其年度车辆行驶里程、汽车能耗强度、燃料排放因子进行估算.

**2.4.2 汽车生产企业** 为了推动汽车生产企业节能技术进步和产品结构调整升级,规定超过一定规模的汽车生产企业有义务使其生产销售的汽车能耗强度小于行业基准能耗强度.因此,汽车生产企业需要根据其履约期内销售的各车型平均能耗强度以及政府设定的相应车型的基准能耗强度,核算企业的实际碳积分,其计算过程如式(10).

$$CC^{FC}(m,t) = \sum_i [FC_i^b(t) - \overline{FC}_i(m,t)] \times N_i(m,t) \quad (10)$$

式中: $m$  代表任意汽车生产企业; $\overline{FC}_i(m,t)$  为汽车生产企业  $m$  在目标年内生产的汽车  $i$  平均能耗强度; $N_i(m,t)$  为汽车生产企业  $m$  在目标年内销售汽车  $i$  的数量; $CC^{FC}(m,t)$  为汽车生产企业  $m$  在目标年的能耗强度碳积分;如  $CC^{FC}(m,t) > 0$ , 则反映企业生产的汽车平均能耗强度小于行业基准能耗强度,按能耗强度差额和销量产生正积分;反之则产生负积分.

汽车生产企业需要在履约期结束后的规定期

限内,向政府提交履约年度碳积分的核算报告以及下一年度各类车型的目标能耗强度,作为政府设定行业基准能耗强度的依据.最终能耗强度碳积分为负的汽车生产企业需要通过碳交易购买其他汽车生产企业的正积分进行抵偿,否则将受到行政处罚或罚款.因此,对于汽车生产企业履约达标的条件为:实际碳积分加交易的碳积分大于零,如式(11).

$$CC^{FC}(m,t) + \Delta CC^{FC}(m,t) \geq 0 \quad (11)$$

式中:  $\Delta CC^{FC}(m,t)$  为汽车生产企业  $m$  在目标年内交易的能耗强度碳积分;当购买碳积分时,  $\Delta CC^{FC}(m,t) > 0$ ;当出售碳配额时,  $\Delta CC(m,t) < 0$ .

**2.4.3 燃料供应企业** 类似的,为了促进低碳燃料的发展,规定超过一定规模的燃料供应企业有义务使其生产销售的燃料排放因子小于行业基准排放因子.因此,燃料供应企业需要根据其履约期内销售各燃料平均排放因子以及政府设定的相应燃料的行业基准排放因子,计算企业的实际碳积分,其计算过程如式(12).

$$CC^{EF}(p,t) = \sum_k [EF_k^b(t) - EF_k(p,t)] \times TFC_k(p,t) \quad (12)$$

式中:  $p$  代表任意燃料供应企业;  $EF_k(p,t)$  为燃料供应企业  $p$  在目标年内生产燃料  $k$  的排放因子;  $TFC_k(p,t)$  为燃料供应企业  $p$  在目标年内销售燃料  $k$  的数量;  $CC(p,t)$  为燃料供应企业  $p$  在目标年的排放因子碳积分;如  $CC^{EF}(p,t) > 0$ ,则反映企业生产的燃料平均排放因子大于行业排放因子,按差额和销量产生正积分;反之则产生负积分.

燃料供应企业需要在履约期结束后的规定期限内,向政府提交履约年度碳积分的核算报告以及下一年度各类燃料的目标排放因子,作为政府设定行业基准排放因子的依据.最终排放因子碳积分为负的燃料供应企业需要通过碳交易购买其他燃料供应企业的正积分进行抵偿,否则将受到行政处罚或罚款.同理,对于燃料供应企业履约达标的条件为:实际碳积分加交易的碳积分大于零,如式(13).

$$CC^{EF}(p,t) + \Delta CC^{EF}(p,t) > 0 \quad (13)$$

式中:  $\Delta CC^{EF}(p,t)$  为燃料供应企业  $p$  在目标年内交易的排放因子碳积分;当购买碳积分时,  $\Delta CC^{EF}(p,t) > 0$ ;当出售碳配额时,  $\Delta CC^{EF}(p,t) < 0$ .

## 2.5 市场交易制度

道路交通碳交易涉及的交易主体主要分为三

类:汽车使用者、汽车生产企业、燃料供应企业,其对应的交易品种分别为碳配额、能耗强度碳积分和排放因子碳积分.由于不同类型责任主体之间减排成本差异较大,为了避免减排责任转移,例如汽车生产企业向汽车使用者低价购买碳配额,而不实质性履行减排义务.因此本文规定只允许同类主体对相同交易品种进行交易.即:汽车使用者只能与其他汽车使用者交易碳配额,汽车生产企业只能与其他汽车生产企业交易能耗强度碳积分,燃料供应企业只能与其他燃料供应企业交易排放因子碳积分.

交易主体可在交易期内通过其碳账户在碳排放交易系统内进行自由交易,不同类别的交易主体和交易品种,其交易方式所有不同.对于汽车使用者交易碳配额,由于交易主体和交易需求较大,采用基于双边拍卖的竞价交易方式(包括集合竞价和连续竞价).对于汽车生产企业和燃料供应企业交易碳积分,由于交易主体较少,一般采用协议转让的方式.

碳交易市场的价格反映了市场内碳配额的稀缺程度,并对不同的责任主体形成不同的利益激励和预期.为了充分发挥市场配置资源的作用,碳配额的价格形成一般都是由市场的供需平衡决定.碳排放总量目标、初始碳配额和行业基准的调整变化都将对碳排放的供需产生直接影响,进而导致碳交易市场价格的波动.大量研究表明<sup>[29-30]</sup>,碳配额价格的过度波动和不确定性将削弱责任主体的减排动力,降低减排效率.而碳交易体系中的惩罚机制,间接为碳交易市场价格设定了上限.同时,为了避免碳交易市场价格过低,影响碳交易的减排效果,政府往往也会规定底线价格.

## 2.6 监测报告核查制度

碳交易的监测报告核查制度(MRV)为碳排放总量设定、初始碳配额分配、行业基准设定、履约与考核提供了数据度量基础,保证了公平性、准确性、可比性,因此是保障道路交通碳交易机制正常运行的前提条件和必然需求,具体可分为监测制度、报告制度和核查制度.

**2.6.1 监测制度** 由于移动排放源的分散性和异质性,其实际碳排放往往难以直接测量,因此目前道路交通碳排放的监测主要通过对汽车使用者的交通活动和燃料消耗进行间接监测.而要实现准确和全覆盖的监测还需要依赖智能化信息技术的支持.

对于交通活动的监测,政府相关部门可通过每年的年检,强制要求并监督所有已注册汽车安装智能里程表,借助物联网技术实现对所有汽车的行驶里程的监测.在履约期末,车上安装的智能里程表将会自动向政府指定的监测中心发送当前里程表的读数,因此每辆汽车在履约期的行驶里程等于目标年末的汽车里程表读数减基准年末的读数.

对于燃料消耗的监测,政府可强制要求所有燃料供应企业在加油站、加氢站等燃料补给站安装智能计费器,以此实现对不同类型汽车的燃料消耗进行监测.每当有汽车来补给燃料,该智能计费器将会显示该车辆的燃料补给量,消费金额以及相应的碳配额,同时将这些数据上传到政府指定的监测中心.

基于上述监测制度,汽车使用者的实际碳排放和碳配额使用情况便都可以获取,以此作为汽车使用者履约与考核的依据.同时,该年度道路交通的排放总量也可计算得到,作为下一年度碳配额总量设定与初始碳配额分配的依据.

**2.6.2 报告制度** 在履约期末,汽车生产企业需要按照政府制定的相关测试规范和试验方法,对目标年销售的汽车按车辆类型和车辆型号进行综合工况下的单位能耗强度测定,并按照规定格式要求向政府相关监管部门报告相关数据,主要包括:汽车类型、汽车型号、燃料类型、能耗强度、销量以及其它汽车参数等,以此作为政府设定行业基准能耗强度以及考核汽车生产企业碳积分的依据;同理,燃料供应企业需要按照政府制定的相关测试规范和试验方法,对目标年销售的燃料按燃料类型进行碳排放因子测定,并按照规定格式要求向政府相关监管部门报告相关数据,主要包括:燃料类型、可再

生能源使用比例、碳排放因子、销量以及其它燃料参数等,以此作为政府设定行业基准排放因子以及考核燃料供应企业碳积分的依据.

**2.6.3 核查制度** 由政府授权的具有相关资质的第三方机构对汽车生产企业和燃料供应企业提交的能耗强度报告和排放因子报告进行核查,以保证报告数据的真实性和准确性.如发现企业报告中存在不实情况,应上报政府有关部门,并根据相关法律法规对不诚信的企业进行惩罚.

### 3 案例与情景分析

基于中国道路交通的真实统计数据,以2017年为基准年,2018年为目标年,对上述建立的政府-企业-居民协同共治的道路交通碳交易机制进行案例试算与情景分析,旨在揭示道路交通碳交易的基本原理与作用机理.

#### 3.1 数据来源

根据汽车用途不同,中国的民用汽车主要分为载客汽车、载货汽车及其他汽车.根据汽车大小规格不同,载客汽车又可分为大型、中型、小型和微型,载货汽车又可分为重型、中型、轻型和微型.由《中国统计年鉴》可得到历年全国民用汽车各车型(暂不考虑农用车等其它机动车)的拥有量以及新注册数量.

由于中国缺少分车型分燃料类型的能源消耗数据统计基础,因此本文基于已有文献数据<sup>[31-32]</sup>,对各车型的平均能耗强度和平均行驶里程进行估算.为了简化计算,本文对不同类型的燃料消耗,统一进行等效热值转换为百公里的汽油消耗当量,估算结果如表1.

表1 各车型平均能耗强度与平均行驶里程

Table 1 Average energy consumption intensity and average mileage of each vehicle type

项目	载客汽车				载货汽车			
	大型	中型	小型	微型	重型	中型	轻型	微型
平均能耗强度(L/100km)	28.5	18.05	9.2	7.8	31.8	27.6	24.2	16.8
平均行驶里程(100km)	200	170	150	120	350	250	210	200

各种类型燃料的含碳量、氧化率、热值等数据原则上需要通过实际测试获得,以便正确反映当地排放源的技术水平和排放特点.但由于各地数据难

以获得,建议采用《IPCC 国家温室气体清单指南2006》以及《省级温室气体清单编制指南》推荐的燃料排放因子,如表2.

表 2 各类型燃料推荐排放因子

Table 2 Recommended emission factors of various fuels

燃料类型	含碳量(kgC/GJ)	碳氧化率(%)	碳排放系数(kgCO <sub>2</sub> /TJ)	热值	碳排放因子
汽油	18.9	0.98	67,914	7800Kcal/L	2.22kgCO <sub>2</sub> /L
柴油	20.2	0.98	72,585	8800Kcal/L	2.67kgCO <sub>2</sub> /L
煤油	19.6	0.98	70,429	8500Kcal/L	2.51kgCO <sub>2</sub> /L
润滑油	20.0	0.98	71,867	9600Kcal/L	2.89kgCO <sub>2</sub> /L
液化石油气	17.2	0.98	61,805	6635Kcal/L	1.72kgCO <sub>2</sub> /L
液化天然气	17.2	0.98	61,805	9900Kcal/m <sup>3</sup>	2.56kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
天然气	15.3	0.99	55,539	8900Kcal/m <sup>3</sup>	2.07kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>

3.2 碳配额总量试算

基于上述 2017 年全国民用汽车拥有量、汽车平均能耗强度、平均行驶里程和燃料排放因子,根据式(1)可对 2017 年已有汽车的碳排放总量进行计算,如表 3 第 2 列.结果显示,2017 年已有汽车碳排放总量为 9.36 亿 t.综合考虑汽车平均报废率以及《交通运输节能环保“十三五”发展规划》的发展目标,确定 2018 年各车型的碳配额下降率如表 3 第 3 列,根据式(2)计算得到各车型已有汽车基准碳排放强度(如表 3 第 4 列),因此根据式(3)可计算得到 2018 年已有汽车的碳配额总量为 8.56 亿 t.

基于新注册民用汽车数量历史数据,分别采用灰色模型和灰色马尔科夫模型对 2018 年各类型新增汽车数量进行预测,如图 2.可见灰色马尔科夫模型具有较好的拟合效果,预测精度优于传统的灰色模型,因此可以用于目标年度新增汽车数量的预测.模型预测的 2018 年各车型新增汽车数量如表 4 第 2 列,假设新增汽车碳配额下降率为已有汽车碳配额下降率的 1.5 倍(如表 4 第 3 列),则根据式(4)可计算出 2018 年新增汽车的基准碳排放强度,如表 4 第 4 列,进而根据式(5)可计算得到 2018 年新增汽车碳配额总量为 1.16 亿 t.

表 3 已有汽车碳排放总量设定

Table 3 Caps on CO<sub>2</sub> emission for existing vehicles

车型	2017 年已有汽车 碳排放总量(kg CO <sub>2</sub> )	2018 年已有汽车 碳配额下降率(%)	2018 年已有汽车 基准碳排放强度(kg CO <sub>2</sub> /车)	2018 年已有汽车 碳配额总量(kg CO <sub>2</sub> )	
载客汽车	大型	1.94×10 <sup>10</sup>	3	12274	1.78×10 <sup>10</sup>
	中型	5.38×10 <sup>9</sup>	3	6608	4.96×10 <sup>9</sup>
	小型	5.53×10 <sup>11</sup>	3	2972	5.09×10 <sup>11</sup>
	微型	4.13×10 <sup>9</sup>	3	2016	3.81×10 <sup>9</sup>
载货汽车	重型	1.57×10 <sup>11</sup>	5	23473	1.42×10 <sup>11</sup>
	中型	2×10 <sup>10</sup>	5	14552	1.81×10 <sup>10</sup>
	轻型	1.77×10 <sup>11</sup>	5	10718	1.59×10 <sup>11</sup>
	微型	4.82×10 <sup>8</sup>	5	7086	4.35×10 <sup>8</sup>
总计	9.36×10 <sup>11</sup>	—	—	8.56×10 <sup>11</sup>	

表 4 新增汽车碳排放总量设定

Table 4 Caps on CO<sub>2</sub> emission for new entrant vehicles

车型	新增汽车 预测数量	2018 年新增汽车 碳配额下降率(%)	2018 年新增汽车 基准碳排放强度(kg CO <sub>2</sub> /车)	2018 年新增汽车 碳配额总量(kg CO <sub>2</sub> )	
载客汽车	大型	176331	4.5	12085	2.13×10 <sup>9</sup>
	中型	53098	4.5	6506	3.45×10 <sup>8</sup>
	小型	22138063	4.5	2926	6.48×10 <sup>10</sup>
	微型	56943	4.5	1984	1.13×10 <sup>8</sup>
载货汽车	重型	1165595	7.5	22855	2.66×10 <sup>10</sup>
	中型	66812	7.5	14169	9.47×10 <sup>8</sup>
	轻型	2043995	7.5	10436	2.13×10 <sup>10</sup>
	微型	795	7.5	6900	5.49×10 <sup>6</sup>
总计	25701632	—	—	1.16×10 <sup>11</sup>	

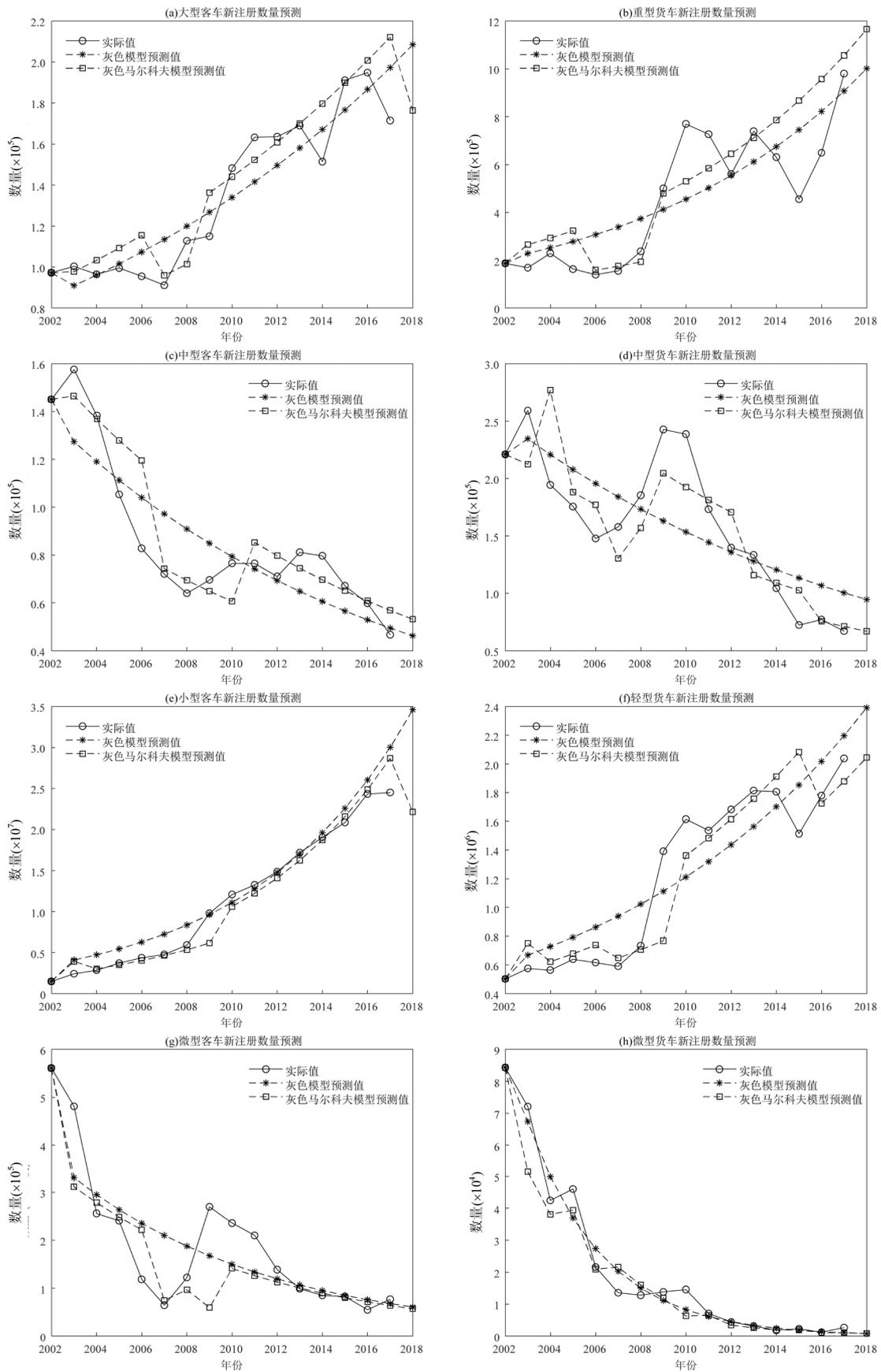


图2 新增汽车数量预测

Fig.2 Prediction of numbers of new entrant vehicles

可见在上述碳配额下降率目标设定下,2018 年中国道路交通碳配额总量为 9.72 亿 t,虽然相比 2017 年道路交通碳排放总量 9.36 亿 t 增加了 4%,因为每年的中国汽车保有量仍在持续增长,但是道路交调整体的碳排放强度可以通过已有汽车和新增汽车的碳配额下降率的设定得到有效地控制。

### 3.3 履约与碳交易情景分析

**3.3.1 汽车使用者** 本案例假设 5 个不同的汽车使用者,包括居民和运输企业,其拥有的汽车类型、数量如表 5 第 2~3 列。根据式(6),初始碳配额由汽车使用者所拥有的各类型汽车数量决定,因此可以计算得到 5 个不同的汽车使用者的初始碳配额,如表 5 第 4 列。例如:居民 A 拥有 1 辆小型载客汽车,根据已有汽车的基准碳排放强度,因此居民 A 将被分配到 2972kg 的初始碳配额。居民 C 在目标年新购买 1 辆小型载客汽车,根据新增汽车的基准碳排放强度,因此居民 A 将被分配到 2926kg 的初始碳配额。可见,不同汽车使用者由于拥有的汽车类型和数量不同,其初始碳配额也将不同。

本案例假设上述 5 个汽车使用者的年平均车辆行驶里程、汽车能耗强度和燃料排放因子如表 5 第 5~7 列,进而可核算各主体在履约年度的实际碳排放,如表 5 第 8 列。例如:居民 A 和居民 B 各拥有一辆相同的小型载客汽车,燃料类型为汽油,汽车能耗强度为 9.2L/100km。其中,居民 A 的年平均车辆行驶里程为 10000km,实际产生碳排放 2024kg,小于其初始碳

配额 2972kg,因此居民 A 达到履约条件,还可通过碳交易市场出售剩余的 948kg 碳配额;而居民 B 的年平均车辆行驶里程为 20000km,实际产生碳排放 4048kg,大于其初始碳配额 2972kg,因此需要通过碳交易市场购买 1076kg 碳配额才能达到履约的标准。而居民 C 在目标年购买了一辆新的小型载客汽车,燃料类型为油电混合,车辆综合能耗强度为 3L/100km,年平均车辆行驶里程为 20000km,实际产生碳排放为 1320kg,小于其初始碳配额为 2926kg,因此居民 C 达到履约条件,还可通过碳交易市场出售剩余的 1606kg 碳配额。

由于道路交通碳交易政策在中国尚未正式实施,缺乏真实交易数据,对于碳配额的交易价格可以参考已有相关研究<sup>[16,33]</sup>中得出的均衡价格(0.43~0.46 美元/kg CO<sub>2</sub>)。因此,本案例假设当前碳配额的平均交易价格为 3 元/kg CO<sub>2</sub>,进而可以计算各主体的碳交易金额,如表 5 第 10 列。可见,居民 A 通过减少车辆行驶里程节省了碳配额,并通过碳交易获得了 2844 元收益;相反居民 B 过多使用汽车导致碳配额不足,则需要付出 3228 元的成本用于购买碳配额;而居民 C 由于购买新能源汽车,具有更大的减排潜力,因此可以节省更多碳配额,可获得 4818 元收益,也可作为购买新能源汽车的补贴。表 5 中运输企业 D 和 E 的履约与碳交易情景同理,在此不再赘述。因此,道路交通碳交易机制可以激励下游汽车使用者减少车辆行驶里程以及购买使用新能源汽车。

表 5 汽车使用者履约与碳交易情景

Table 5 Scenarios of compliance and emission trading of vehicle users

汽车使用者	汽车类型	数量	初始碳配额 (kg)	年均车辆行驶 里程(km)	汽车能耗强度 (L/100km)	燃料排放因子 (kgCO <sub>2</sub> /L)	碳排放量 (kg)	碳交易数量 (kg)	碳交易金额 (元)
居民 A	已有小型载客汽车	1	2972	100,000	9.2	2.2	2024	948	2844
居民 B	已有小型载客汽车	1	2972	200,000	9.2	2.2	4048	-1076	-3228
居民 C	新增小型载客汽车	1	2926	200,000	3	2.2	1320	1606	4818
运输企业 D	已有大型载客汽车	10	122740	200,000	28.5	2.2	125400	-2660	-7980
运输企业 E	新增大型载客汽车	10	120850	200,000	25	2.2	110000	10850	32550

**3.3.2 汽车生产企业** 本案例假设传统燃油汽车生产企业 A 和新能源汽车生产企业 B,目标年所生产汽车的车型、燃料类型、能耗强度以及销量分别如表 6 第 2、3、4、6 列。根据国家现行汽车燃料消耗量标准体系,结合汽车节能技术的发展目标,设定不同车型的行业基准能耗强度,如表 6 第 5 列。根据

式(8),汽车生产企业销售的各车型汽车能耗强度如果低于相应的行业基准,则产生正积分,否则产生负积分,进一步可核算汽车生产企业 A 和 B 的能耗强度碳积分,如表 6 第 7 列。

在本案例中,传统燃油汽车生产企业 A,其销售的所有车型汽车能耗强度均大于行业基准,因此产

生 4250 个负碳积分,需要通过碳积分交易进行抵偿才能实现履约达标;而新能源汽车生产企业 B,通过生产纯电动汽车和插电式混合动力汽车,使其各车

型能耗因子均低于行业基准,因此产生 3250 个正碳积分,满足履约条件,并且可以通过碳积分交易出售这些碳积分获得额外的收益。

表 6 汽车生产企业履约与碳交易情景

Table 6 Scenarios of compliance and emission trading of vehicle manufacturers

汽车生产企业	车型	燃料类型	能耗强度 (L/100km)	行业基准能耗强度 (L/100km)	销量 (辆)	碳积分	碳交易金额 (万元)
传统燃油汽车企业 A	微型载客汽车 A1	汽油	7.5	7	30000		
	小型载客汽车 A2	汽油	8.5	8	50000	-42500	-8500
	中型载客汽车 A4	汽油	16.5	16	5000		
新能源汽车企业 B	微型载客汽车 B1	纯电动	1.5	7	1000		
	小型载客汽车 B2	插电式混合动力	5	8	5000	32500	6500
	中型载客汽车 B3	纯电动	10	16	2000		

根据我国现行政策《乘用车企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分并行管理办法》(“双积分”)的实施情况,单个燃料消耗量负积分的合规成本约为 1300~2900 元/分<sup>[34]</sup>。借鉴于此,本案例假设目标年能耗强度碳积分的平均交易价格为 2000 元/分(L/100km),进而可计算出汽车生产企业 A 和 B 的碳交易金额,如表 6 第 8 列。可见,生产高能耗汽车的企业将面临高额的碳积分购买成本,而生产新能源汽车的企业则可通过出售碳积分获得节能技术研发的补贴。因此,道路交通碳交易机制可以倒逼行业汽车能耗强度的整体下降。

**3.3.3 燃料供应企业** 假设传统燃料供应企业 A 和可再生燃料供应企业 B,目标年所生产的燃料类型、排放因子以及销量分别见表 7。根据式(8),

设定不同类型燃料的行业基准排放因子(表 7)。根据式(12),燃料供应企业销售的各种类型燃料排放因子如果低于相应的行业基准,则产生正积分,否则产生负积分,进一步可核算燃料供应企业 A 和 B 的排放因子碳积分(表 7)。

在本案例中,传统燃料供应企业 A 销售的汽油和柴油实际排放因子均大于行业基准,因此产生 195000 个负碳积分,需要通过碳交易进行抵偿才能实现履约达标;而可再生燃料供应企业 B 通过在汽油和柴油中混合一定比例的生物燃料,使其排放因子低于行业基准,因此产生 204000 个正碳积分,满足履约条件,并且可以通过碳交易出售这些碳积分获得额外的收益。

表 7 燃料供应企业履约与碳交易情景

Table 7 Scenarios of compliance and emission trading of fuel producers

燃料供应企业	燃料类型	燃料排放因子 (kg CO <sub>2</sub> /L)	行业基准排放因子 (kg CO <sub>2</sub> /L)	销量 (L)	排放因子碳积分	碳交易金额(万元)
燃料供应企业 A	汽油	2.22	2.2	8000000	-195000	-58.5
	柴油	2.67	2.6	500000		
燃料供应企业 B	乙醇汽油	2.14	2.2	3000000	204000	61.2
	生物柴油	2.48	2.6	200000		

由于缺乏燃料排放因子碳积分交易的真实价格数据,本案例主要参考相关文献中的燃料供应企业边际减排成本数据。Holland 等<sup>[35]</sup>基于一系列的汽油和乙醇供需变化参数,估算了在美国加州低碳燃料标准(LCFS)<sup>[36]</sup>和碳交易政策下,燃料供应企业的边际减排成本约为 60~868 美元/t CO<sub>2</sub>。借鉴于此,本案例假设目标年排放因子碳积分的

平均交易价格为 3 元/分(kg CO<sub>2</sub>),进而可计算出燃料供应企业 A 和 B 的碳交易金额,如表 7 第 7 列。可见,生产高碳燃料的企业将面临高额的碳积分购买成本,而生产可再生燃料的企业则可通过出售碳积分获得投资低碳技术的补贴。因此,道路交通碳交易机制可以有效驱动行业燃料排放因子的整体下降。

## 4 结论

4.1 基于市场机制的道路交通碳交易政策通过设定碳配额总量可以确保道路交通减排目标的落实,克服了单一减排措施的反弹效应与不确定性,且具有经济性、灵活性的优势,能够有效控制道路交通温室气体排放增长,帮助国家有计划、高效率地实现“碳达峰、碳中和”的宏伟目标,对全球气候治理起到关键性推动作用。

4.2 综合考虑政府、燃料供应企业、汽车生产企业、汽车使用者等多类异质责任主体,将相互独立的上游、中游、下游道路交通碳交易机制进行耦合,建立政府-企业-居民协同共治的道路交通碳交易机制,可以全面促进燃料排放因子、汽车能耗强度、交通活动需求 3 个道路交通碳排放关键影响因素的协同优化,大幅提高道路交通减排效率,进而驱动道路交通低碳转型。

4.3 在多主体协同的道路交通碳交易机制中,政府主导碳排放总量的设定与分配,燃料供应企业和汽车生产企业通过低碳技术研发或者碳交易履行减排责任,汽车使用者则通过减少交通出行需求和使用新能源汽车减少个人碳排放,实现道路交通碳排放由政府单一主体治理向政府、企业、居民等多主体协同共治的转型升级,推进国家气候治理能力现代化。

4.4 本文提出的道路交通碳交易机制是一个帮助政府实现道路交通节能减排与“碳中和”战略目标的探索性政策工具,目前尚未在任何国家或地区落地实行。因此,该政策的实施效果还存在较大不确定性,后续研究需要结合国家已有的道路交通节能减排政策,通过多主体建模与仿真等方法,进一步分析道路交通碳交易与不同政策组合的作用机理和影响效应。

### 参考文献:

- [1] Biról F. CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion Highlights (2020 Edition) [R]. Paris: OECD/IEA, 2020.
- [2] 李 晔,李文翔,魏愚葵. 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 Y, Li W X, Wei Y A. Research progress and prospect of road transport carbon emission trading [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018,46(4):465-471.
- [3] 周 迪,刘奕淳. 中国碳交易试点政策对城市碳排放绩效的影响及机制 [J]. 中国环境科学, 2020,40(1):453-464.  
Zhou D, Liu Y C. Impact of China's carbon emission trading policy on the performance of urban carbon emission and its mechanism [J]. China Environmental Science, 2020,40(1):453-464.
- [4] Han R, Yu B, Tang B, et al. Carbon emissions quotas in the Chinese road transport sector: A carbon trading perspective [J]. Energy Policy, 2017,106:298-309.
- [5] 王善勇,李 军,范 进,等. 个人碳交易视角下消费者能源消费与福利变化研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2017,37(6):1512-1524.  
Wang S Y, Li J, Fan J, et al. Study on consumers' energy consumption and welfare changes under the personal carbon trading scheme [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2017,37(6):1512-1524.
- [6] Li W, Wang L, Li Y, et al. A blockchain-based emissions trading system for the road transport sector: policy design and evaluation [J]. Climate Policy, 2021,21(3):337-352.
- [7] 张 新,马金涛. 交通系统碳交易实现途径研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2016,26(3):46-53.  
Zhang X, Ma J. Realization method of carbon trading of transportation system [J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(3):46-53.
- [8] Wadud Z, Noland R B, Graham D J. Equity analysis of personal tradable carbon permits for the road transport sector [J]. Environmental Science & Policy, 2008,11(6):533.
- [9] Wadud Z. Personal tradable carbon permits for road transport: Why, why not and who wins? [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2011,45(10):1052.
- [10] Mock P, Tietge U, German J, et al. Road transport in the EU emissions trading system: An engineering perspective [R]. Washington D C: International Council on Clean Transportation, 2014.
- [11] Wadud Z. Personal tradable carbon permits for road transport: Heterogeneity of demand responses and distributional analysis [D]. London: Imperial College London, 2007.
- [12] Watters H, Tight M. Designing an emissions trading scheme suitable for surface transport [R]. Leeds: Institute for Transport Studies, University of Leeds, 2007.
- [13] SORRELL S. An upstream alternative to personal carbon trading [J]. Climate Policy, 2010,10(4):481.
- [14] Michaelis P, Zerle P. From ACEA's voluntary agreement to an emission trading scheme for new passenger cars [J]. Journal of Environmental Planning & Management, 2006,49(3):435.
- [15] Raux C, Croissant Y, Pons D. Would personal carbon trading reduce travel emissions more effectively than a carbon tax? [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2015, 35:72-83.
- [16] 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, 2016,170(2):86-98.
- [17] Fawcett T. Personal carbon trading: A policy ahead of its time? [J]. Energy Policy, 2010,38(11):6868-6876.
- [18] Millard-Ball A. Municipal mobility manager: new transportation funding stream from carbon trading? [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2008,2079: 53-61.

- [19] Bongardt D, Creutzig F, Hüging H, et al. Low-carbon land transport: Policy handbook [M]. Routledge, 2013.
- [20] Creutzig F, McGlynn E, Minx J, et al. Climate policies for road transport revisited (I): Evaluation of the current framework [J]. *Energy Policy*, 2011,39(5):2396.
- [21] 李文翔,李 晔,董洁霜,等.引入碳交易机制的新能源汽车发展路径研究 [J]. *系统仿真学报*, 2021,33(6):1451-1465.  
Li W X, Li Y, Dong J S, et al. Development paths of new energy vehicles incorporating CO<sub>2</sub> emissions trading scheme [J]. 2021, 33(6):1451-1465.
- [22] 闫云凤.中国碳排放权交易的机制设计与影响评估研究 [M]. 北京:首都经贸大学出版社, 2017.  
Yan Y F. China's carbon emission trading system: scheme design and impact assessment [M]. Beijing: Capital University of Economics and Business Press, 2017.
- [23] Jiang J, Ye B, Ma X, et al. Controlling GHG emissions from the transportation sector through an ETS: institutional arrangements in Shenzhen, China [J]. *Climate Policy*, 2016,16(3):353-371.
- [24] Paustian K, Ravindranath N H, Amstel A V. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [M]. International Panel on Climate Change, 2006.
- [25] 赵海龙.中国汽车保有量预测建模及其应用研究 [D]. 长沙:湖南大学, 2009.  
Zhao H L. A study on modeling and forecasting of the number of automobiles owned by China and its empirical analysis [D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [26] 杨 琦,杨云峰,冯忠祥,等.基于灰色理论和马尔科夫模型的城市公交客运量预测方法 [J]. *中国公路学报*, 2013,26(6):169-175.  
Yang Q, Yang Y F, Feng Z X, et al. Prediction method for passenger volume of city public transit based on grey theory and Markov model [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2013,26(6):169-175.
- [27] 段茂盛,庞 韬.碳排放权交易体系的基本要素 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2013,23(3):110-117.  
Duan M S, Pang T. Basic elements of emission trading scheme [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2013,23(3):110-117.
- [28] 王先甲,肖 文,胡振鹏.排污权初始权分配的两种方法及其效率比较 [J]. *自然科学进展*, 2004,14(1):81-87.  
Wang X J, Xiao W, Hu Z P. Two methods of initial allocation of pollutant emission rights and their efficiency comparison [J]. *Progress in Natural Science*, 2004,14(1):81-87.
- [29] 陈晓红,曾祥宇,王傅强.碳限额交易机制下碳交易价格对供应链碳排放的影响 [J]. *系统工程理论与实践*, 2016,36(10):2562-2571.  
Cheng X H, Zeng X Y, Wang F Q. Impact of carbon trading price on carbon emission in supply chain under the cap-and-trade system [J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2016,36(10):2562-2571.
- [30] 史 丹,张 成,周 波,等.碳排放权交易的实践效果及其影响因素:一个文献综述 [J]. *城市与环境研究*, 2017,(4):93-110.  
Shi D, Zhang C, Zhou B, et al. The implementation effect and influencing factors of carbon emission trading: a review [J]. *Urban and Environmental Studies*, 2017,(4):93-110.
- [31] 韩亚倩,张 昕,孟庆阔.乘用车油耗水平现状分析与节能技术研究 [J]. *汽车工业研究*, 2017,(12):36-41.  
Han Y Q, Zhang X, Meng Q K. Analysis of the current situation of fuel consumption level of passenger cars and research on energy-saving technologies [J]. *Auto Industry Research*, 2017,(12):36-41.
- [32] 贾顺平,毛保华,刘 爽,等.中国交通运输能源消耗水平测算与分析 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2010,10(1).  
Jia S P, Mao B H, Liu S, et al. Calculation and analysis of transportation energy consumption level in China [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2010,10(1).
- [33] Fan J, He H, Wu Y. Personal carbon trading and subsidies for hybrid electric vehicles [J]. *Economic Modelling*, 2016,59(1):164.
- [34] 吕 力,葛 鹏,柳邵辉.基于节能与新能源技术路径的双积分合规成本测算模型及其应用 [J]. *汽车工业研究*, 2019,(1):41-44.  
Lv L, Ge P, Liu S H. A double credit compliance cost measurement model based on energy efficiency and new energy technology paths and its application [J]. *Auto Industry Research*, 2019,(1):41-44.
- [35] Holland S P, Hughes J E, Knittel C R. Greenhouse gas reductions under low carbon fuel standards? [J]. *American Economic Journal: Economic Policy*, 2009,1(1):106-146.
- [36] Yeh S, Sperling D. Low carbon fuel standards: Implementation scenarios and challenges [J]. *Energy Policy*, 2010,38(11):6955-6965.

**作者简介:** 李文翔(1992-),男,江西赣州人,讲师,博士,主要从事低碳交通政策研究.发表论文 20 余篇.