

中国道路运输行业 CO₂ 和污染减排潜力情景分析

李 晔, 包 磊, 李文翔, 张怡然

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 为了评估中国交通道路运输行业减排潜力, 基于长期能源替代规划系统(LEAP)建立了 LEAP-Tran 模型, 并应用该模型模拟分析了两种不同情景下(基准情景和综合措施情景, 后者包括组织管理措施、技术进步措施和能源结构升级措施三种情景)中国道路运输行业 2012~2030 年 CO₂ 和其他大气污染物排放水平, 通过估算减排贡献率识别了行业减排措施推广时间和重点部门。模拟结果表明, 相对于基准情景, 综合措施情景在 2030 年 CO₂, CO, NO_x, PM₁₀ 和 HC (碳氢化合物) 污染物排放分别减少 39.6%, 58.6%, 91.5%, 79.9% 和 83.9%。各子情景中, 组织管理措施 CO₂ 和 CO 减排效果最佳, 技术进步措施对其他污染物减排贡献度大, 能源结构升级措施减排效果较小, 但呈现增长势头。因此, 道路运输行业具有巨大的减排潜力, 近期减排主要通过组织管理措施和技术进步措施, 如大力推广营运货车节能技术和制定更为严格的尾气排放标准。

关键词: CO₂ 排放; 污染物排放; 长期能源替代规划系统; 道路运输行业; 情景分析

中图分类号: U491.9⁺2

文献标志码: A

Scenario Analysis of CO₂ and Pollutant Emission Mitigation Potential for China's Road Transportation Sector

LI Ye, BAO Lei, LI Wenxiang, ZHANG Yiran

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to assess the emission reduction potential in road transportation sector in China, a LEAP-Tran model based on long range energy alternatives planning system (LEAP) was developed. With the model, 2 scenarios of CO₂ and pollutant emissions in China's transport sector from 2012 to 2030, Business as Usual (BAU) scenario and Comprehensive Measure (CM) scenario, which included three available emission reduction sub-scenarios, namely

organizational-management (OM) sub-scenario, technological-progress (TP) sub-scenario and energetic-structure promotion (EP) sub-scenario, were first simulated. Then, the energy consumption up to 2030 was estimated in these five scenarios. Based on the emission reduction contribution rates of each scenario, the promotion schedule of emission reduction measures and key emission reduction sectors were identified. The simulation results show that the emissions of CO₂, CO, NO_x, PM₁₀ and HC in 2030 in the CM scenario are respectively 39.6%, 58.6%, 91.5%, 79.9% and 83.9% lower than those in the BAU scenario. In the sub-scenarios, OM is the most effective measure for reducing CO₂ and CO emissions, while TP is the most effective measure for reducing NO_x, PM₁₀ and HC emissions. EP has a smaller effect in reducing emissions, but it shows a rapid growth and may play an important role in the future. In conclusion, There is a great potential for reduction in road transportation sector in China. In order to achieve the short-term emission reduction targets, Chinese government should implement OM and TP measures, such as the promotion of transportation energy-saving technologies and development of the more strict emission standard.

Key words: CO₂ emission; pollutant emission; long-range energy alternatives planning syhstem (LEAP); road transportation sector; scenario analysis

目前, 中国已经成为全球温室气体排放最高且增速最快的国家, 其 2013 年碳排放量超过了欧盟和美国的总和, 占全球总排放的 29%^[1], 在 2030 年左右达到碳排放峰值的目标下, “新常态”时期的中国将面临越来越大的减排压力。而作为仅次于工业行业和建筑行业的我国第三大温室气体排放源, 道路运输行业温室气体排放占全国总排放的 8%, 随着运输需求与机动车保有量的快速增长, 其能耗、CO₂ 和

收稿日期: 2015-01-23

基金项目: 交通运输部软科学研究(2013-312-822-370); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-0383)

第一作者: 李 晔(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为低碳交通规划、慢行交通以及交通政策。

E-mail: jamesli@tongji.edu.cn

通讯作者: 包 磊(1989—), 男, 博士生, 主要研究方向为可持续交通政策. E-mail: baolei19891225@gmail.com

污染物排放量也必将持续快速增长^[2]. 在能源紧缺、温室效应和环境污染的三重压力“倒逼”下,道路运输行业需要承担越来越多的减排压力,其低碳绿色发展显得尤为必要. 因此,从行业减排角度研究中国道路运输行业减排潜力和相应对策意义深远.

为了量化和分析道路运输行业长期措施的节能减排效果,本研究首先建立了包含中国道路运输行业技术结构、能源需求等信息的 LEAP(长期能源替代规划系统)-Tran 模型,然后通过自下而上的方法计算了不同政策情景下中国道路运输行业 2012~2030 年 CO₂ 排放和污染物排放量,分析评估了中国道路运输行业的减排潜力以及减排措施有效性,为我国道路运输行业排放峰值研究以及节能减排政策制定提供了帮助.

1 LEAP-Tran 模型

LEAP 模型是由斯德哥尔摩环境实验所与美国波士顿大学研究中心(SEI-B)共同开发的一个能源环境核算情景分析模型,适用于能源预测、温室气体减排分析、综合资源规划等研究^[3-6]. 由于其模型内置交通分析模块,因此也被广泛应用于交通能源建模的研究中. 相关国际研究主要集中在数据较为缺乏的发展中国家,泰国^[7]、巴基斯坦^[8]、伊朗^[9]等国家均建立过符合当地实际情况的 LEAP 模型,以用于评估自身交通行业减排潜力和政策效果. 近年来,我国一些学者也应用 LEAP 模型对交通行业展开了相关研究^[10-13]. 如彭彬彬等构建了天津市城市交通能耗与排放模型,分析比较了道路运输部门基准情景和政策实施情景下 2010~2030 年的能耗和排放情况^[10]. 周健等建立了厦门交通模型,分析了 2008~2030 年能源消费量以及污染物排放量,并评估各种节能减排措施的效果^[11]. 于灏等建立了北京城市客运交通-能源-环境模型,计算了 2020 年在不同政策情景下能耗和排放趋势,认为大力发展公共交通,改善终端能源结构对减缓大气污染具有重要作用^[12]. 但上述研究大都针对于城市客运交通系统,缺少对全国范围内整个道路运输行业 CO₂ 和污染物减排潜力的综合全面的分析.

1.1 模型结构

本文在全国层面上构建了中国道路运输行业能源排放模型 LEAP-Tran,模型数据从道路运输行业特点出发设置分支结构. 考虑营运性车辆,划分为城市客运和公路运输,城市客运行业又分为公共汽

(电)车和出租车,公路道路运输行业主要包括公路营运性载客汽车和营运性载货汽车. 各子部门和终端利用的设定取决于详细的部门能源消费特征,参考《2012 年中国交通运输统计年鉴》对车型结构的划分,设定的模型结构如表 1 LEAP-Tran 模型中部门结构所示.

表 1 LEAP-Tran 模型中部门结构
Tab.1 Sectoral structure in LEAP-Tran

部门	子部门	终端利用	设备燃料类型
城市客运	公共汽(电)车	汽油车	汽油
		乙醇汽油车	乙醇、汽油
		柴油车	柴油
		液化石油气车	液化石油气
		压缩天然气车	压缩天然气
		电动公交	电能
	出租车	混合动力	电能、柴油
		汽油车	汽油
		乙醇汽油车	乙醇、汽油
		柴油车	柴油
		液化石油气车	液化石油气
		压缩天然气车	压缩天然气
公路运输	载客汽车	电动出租	电能
		中小型客车	汽油
	载货汽车	大型客车	柴油
		中小型货车	汽油、柴油
		大型货车	柴油
		专用非集装箱货车	柴油
		集装箱货车	柴油

1.2 计算公式

LEAP-Tran 对于道路运输行业排放的核算遵从 ASIF 方法,其分别指代交通活动水平(activity)、运输车辆组成结构(structure)、能源强度(intensity)和燃料种类(fuels). ASIF 方法作为交通行业能耗排放核算自下而上的基础,自 2000 年 Schipper L 发表以来^[14],已经得到了普遍认可和广泛应用^[15]. 依据 ASIF 核算方法,本研究在 LEAP-Tran 中对每一个分支终端所对应设备的排放进行自下而上的计算汇总,模型计算过程分为能源需求计算、CO₂ 排放和污染物排放计算三个部分.

1.2.1 能源消耗计算

道路运输行业能源消耗总量为

$$S_E = \sum_j \sum_i (365 V_{ij} M_{ij} e_{ij})$$

式中: S_E 为道路运输行业能源消耗总量; V_{ij} 为使用 i 种能源 j 类车辆的汽车保有量; M_{ij} 为汽车的日均行驶里程或日均周转量; e_{ij} 为能耗因子,即车辆单位车公里能耗或单位周转量能耗.

1.2.2 CO₂ 排放计算

参照《2006 年 IPCC 国家温室气体指南》移动源

燃烧的碳排放计算方法,其计算公式为

$$S_C = \sum_j (S_{Ej} c_j)$$

式中: S_C 为 CO_2 排放总量; c_j 为 j 类能源的碳排放因子,即单位 j 能源完全燃烧产生的 CO_2 质量。

1.2.3 污染物排放计算

机动车大气污染物排放主要源于燃料中的杂质和不完全燃烧过程,因此其排放强度很大程度上取决于车辆内燃机技术、行驶工况和油品质量等。考虑上述因素,道路运输行业污染物排放总量计算采用了我国环保部公布的机动车排放空气污染测算方法^[16],其计算公式为

$$S_{Pk} = \sum_j \sum_i (365 V_{ij} M_{ij} p_{ijk})$$

式中: S_{Pk} 为污染物 k 的排放总量; p_{ijk} 为污染物排放因子,即使用 i 种能源的 j 类型车的汽车每公里污染物 k 的排放量。

1.3 基准年排放

本研究以 2012 年为基准年,LEAP-Tran 模型中行业基础数据主要参考了《2012 年交通运输统计年鉴》,包括车辆保有量、年行驶里程、周转量等。各车型能耗强度数据来源《2012 年公路水路交通运输行业发展统计公报》。公共汽(电)车排放标准结构组成同样参考《2012 年交通运输统计年鉴》,其他类别车辆车型结构组成由我国车龄变化曲线及历年车辆数推算得出。碳排放因子参考《城市温室气体排放核算工具》中给定的我国 CO_2 默认排放因子,不同排放标准车辆污染物排放因子由国家环境保护部机动车排污监控中心提供。

经计算,2012 年我国道路运输行业 1 517.36 万辆机动车共消耗 4.22 亿 t 标煤能量,产生 8.81 亿 t CO_2 ,并排放了 142.01 万 t CO、215.04 万 t NO_x 、14.83 万 t PM_{10} 和 74.5 万 t HC。

2 情景设定

为了更科学地反映未来中国道路运输行业的节能减排潜力,本文根据未来中国社会经济发展趋势,结合道路运输行业发展现状,并参考国外发达国家交通发展路径,设置了以下两种发展路径:基准情景和综合减排情景。两种情景以 2012~2030 年为分析年限,对道路运输行业未来发展趋势进行了一系列合理、大胆假设。同时为了进一步分析不同类别措施具体的减排潜力,又将综合减排情景划分为三类子情景:技术进步、组织管理和能源结构升级。

2.1 基准情景

第一种情景为基准情景,其核心假设是在情景预测期内城市客运结构、公路运输结构、运输部门基础设施投入、不同类型车辆的能效和排放水平没有特别大的变化或重大的技术突破,而是处于很缓慢、渐进的状态,同时没有采取重大节能对策措施时的方案。该方案显示了政府在不作为情况下我国道路运输行业能耗和排放的发展趋势,可用于衡量其他情景的减排潜力。具体设置时主要变动交通活动水平类参数,机动车保有量和客运周转量趋势通过往年数据拟合得出。由于货运周转量和经济增长之间有良好的相关关系,且高能耗和能源产品是货物运输的主要驱动因子,因此设定我国道路运输行业货运周转量在 2020 年中国完成工业化后增速放缓^[17]。

2.2 综合减排情景

综合减排情景是指政府积极制定和大力推行各种可行的节能减排措施,以促进道路运输行业走低碳化绿色化发展路径的情景。依据我国《交通运输“十二五”发展规划》和《公路水路交通节能中长期规划纲要》中“中国道路运输行业节能减排措施主要包括技术性节能减排、管理性节能减排、结构性节能减排”的共识,本研究在设定综合减排情景时,分别考虑了技术进步、组织管理和能源结构升级三类子情景。

技术进步子情景假设交通运输工具在节能技术方面有长足进步,提高了能源利用效率,具体政策措施包括燃油经济性标准、机动车尾气排放标准和车辆节能改进等,主要变动参数为能源强度类和排放因子类。按照全球燃油经济性行动中制定的目标,中国将实施更为严格的机动车燃油经济性标准,预期 2030 年新增车辆单位能耗较基准年将下降近 40%^[17]。同时国 V、国 VI 机动车尾气排放标准也将尽快实施。

组织管理子情景注重优化运输行业运营,完善节能减排管理制度和提高驾驶员节能意识,具体政策措施包括税费管理、生态驾驶推广、物流现代化建设、机动车报废管理等,主要变动参数为运输车辆组成结构类。在各项组织管理类措施有效作用的前提下,单位周转量能耗较低的大型客车和专业货车的比例逐年提高,接受生态驾驶培训的专业驾驶员比例显著提升,排放严重的黄标车车辆全部淘汰。

能源结构升级子情景则考虑优化传统化石燃料为主导的道路运输新能源结构,通过引入清洁能源实现减排,包括新能源汽车推广和替代燃料推广等,

主要变动参数为车辆组成结构和燃料类别参数. 该情景中新能源汽车在城市客运中的比例逐渐提升, 公路运输行业中天然气、乙醇汽油等替代燃料使用比例提升. 针对上述各类单项措施的减排效果, 国内

外学者进行了大量的定量和定性研究, 本文在情景参数的具体设定同时参考了这些研究成果以及我国计划落实的相关中远期规划^[11,17-22], 情景参数具体说明和依据如表 2 所示.

表 2 情景参数说明

Tab.2 Parameter description in scenarios

情景名称	子情景	参数说明	参考依据
情景 1 (基准)		机动车保有量和客运周转量按原有趋势增长, 货运周转量增长在 2020 年后减速; 机动车单位里程能耗按往年趋势略有下降, 至 2030 年新增车辆能耗降低约 20%; 2012 年后不再制定新的排放标准; 车型组成结构基本不变.	《中国 2050 年低碳发展之路》 ^[17] 等
情景 2 (综合减排)	情景 3 (技术进步)	新增车辆单位里程油耗 2030 年下降 40%; 2016 年实施国五排放标准, 2020 年实施国六排放标准 ¹⁾ ; 对货车进行燃油经济性改进, 经过改进后车辆燃油经济性提高 10%.	全球燃油经济行动 ^[18] 、Cooper ^[20] 等
	情景 4 (组织管理)	2015 年底, 报废所有黄标车; 加强税费管理, 参照 Goodwin 相关研究, 至 2020 年周转量减少 3%, 燃油经济性增长 4%. 2030 年公路客运每年新增大型客车比例为 60%, 新增专业货运车辆比例为 30%; 推广生态驾驶培训, 培训后驾驶员驾驶车辆单位里程能耗下降 10%; 建设现代化物流, 2030 年减少空驶率至 20%, 专业货车完成货物周转量占 30%.	《2014~2015 年节能减排低碳发展行动方案》、Goodwin ^[21] 、Buniaux ^[22] 等
	情景 5 (能源升级)	2020 年和 2030 年城市客运部门新增车辆中新能源车辆分别占 15% 和 40%, 其中纯电动车与混合动力车占比相同; 新增车辆中天然气公交车辆 2020 年比重达到 30%, 2030 年达到 50%; 出租车比重 2020 年达到 20%, 2030 年达到 40%; 公路客货替代燃料车辆比例 2020 年达到 10%, 2030 年为 30%.	《关于加快新能源汽车推广应用的实施意见(征求意见稿)》、周健 ^[11] 等

1) 表中所提机动车尾气排放国 V、国 VI 标准, 均以欧盟尾气排放标准欧五和欧六为参考.

3 分析结果

3.1 能源消耗和 CO₂ 排放

基准情景下, 中国道路运输行业能源消费总量和 CO₂ 排放量呈现持续性线性增长. 二者趋势基本相同, 2020 年较基准年翻一番, 2030 年约为基准年 3 倍, 分别达到 11.74 亿 t 标准煤和 24.63 亿 t CO₂, 年均增速约为 5.8%. 如图 1 所示, 情景 2 所表示的综合减排情景节能减排效果最为明显, 所呈现的能耗和排放曲线最为平缓, 其 2030 年 CO₂ 排放约为基准年的 1.7 倍, 较基准情景减少了 9.76 亿 t CO₂, 但可以看出直至 2030 年仍未达到峰值. 综合减排情景中三个子情景的减排效果表现从高至低依次为组织管理、技术进步和能源结构升级.

3.2 污染物排放

图 2 展示了不同情景下, 四类大气污染物的排放情况. 在基准情景下, 由于机动车尾气国 IV 排放标准的实施, 各个污染物排放增长速率在 2020 年得到了一定的抑制, 特别是国 IV 标准中消减幅度最大的 PM₁₀ 排放, 甚至出现了下降的趋势. 2020 年后, 由于车辆更新换代结束, 但机动车保有量及客货运周转量仍增长迅猛, 因此各个污染物排放也开始急速增长, 可吸入颗粒物排放也出现回升情况. 2030 年 NO_x 排放量增长为 2012 年的 3 倍左右, CO 排放增

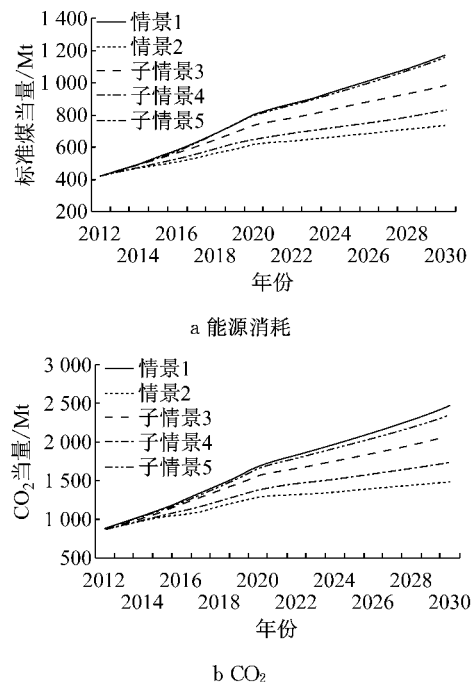


图 1 2012~2030 年不同情景下中国道路运输行业能源消耗与 CO₂ 排放

Fig.1 CO₂ emissions of China's road transportation sector under different scenarios from 2012 to 2030

长为 2 倍左右, HC 排放增长为 2.5 倍左右, 其 PM₁₀ 排放基本保持平稳.

情景 2 下, 除 CO 排放几乎保持水平状态外, 其余三种污染物均呈现较大幅度的下降. 综合减排情

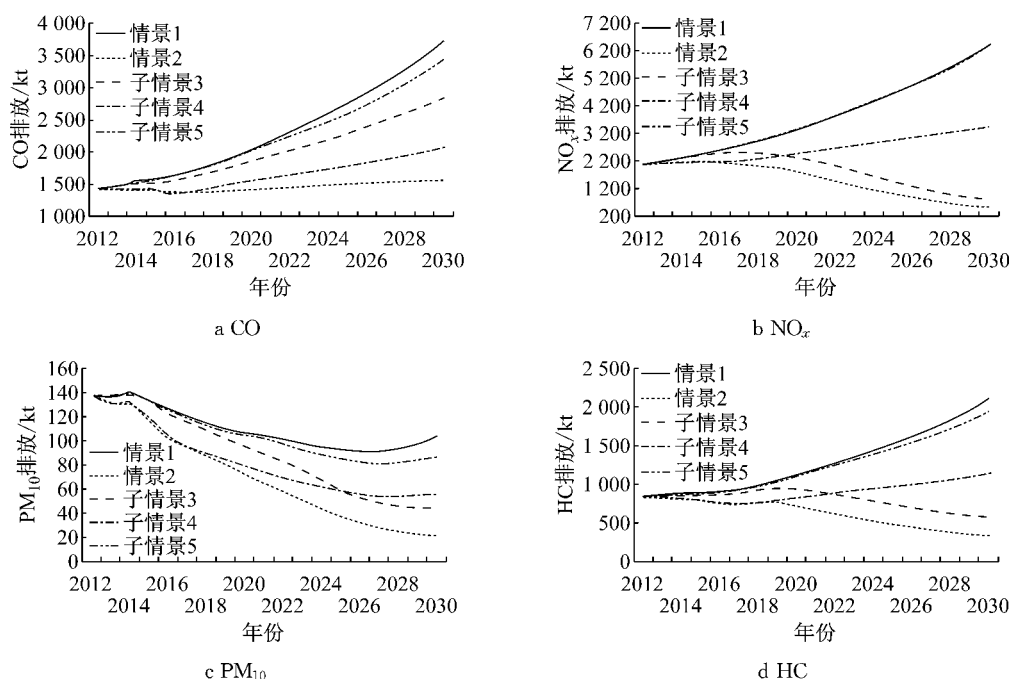


图2 2012~2030年不同情景下道路运输行业污染物排放

Fig.2 Pollutants emissions of China's road transportation sector in different scenarios from 2012 to 2030

景下,2030年CO、NO_x、PM₁₀和HC排放与基准年2012年相比,分别为其107.7%、26.0%、15.1%和40.1%;与基准情景2030年排放相比,分别为其41.4%、8.5%、20.1%和16.1%。可见在综合政策措施的实施下,各种大气污染物都有明显的减排效果。3个子情景在各个污染物减排方面表现不尽相同,对于CO污染物子情景4组织管理减排效果最为明显,较基准情景2030年减少约166万t CO。其余三项污染物NO_x、PM₁₀和HC减排效果最理想的均为技术进步措施,较基准情景2030年分别减少约559万t、6万t和152万t,这是由于机动车尾气排放标准国五、国六的实施,CO以外的各项污染物排放因子有大幅度的降低。子情景5表示的能源结构升级路径在2012~2030年期间,污染物减排潜力虽然较低,但有逐渐增大的趋势。

3.3 减排贡献度分析

3.3.1 子情景减排贡献度

在情景2综合减排情景中,各子情景减排效果不尽相同,且随时间变化较大。为了比较各个子情景的减排效果,本研究分析了各减排措施相应的减排贡献度,即各个子情景减排量占综合减排情景减排量的比例。具体包括三个时间节点,分别为2015年(“十二五”末期)、2020年(“十三五”末期)和2030年(长期)。三个子情景下政策措施对CO₂和污染物减排贡献度如表3所示。2015年,组织管理情景的CO₂减排贡献度近70%,污染物减排贡献度均高达

80%以上,明显高于其他子情景;2020年,组织管理贡献度有所下降,其他子情景贡献度增长,其中技术进步的情景NO_x减排贡献度已经超越组织管理,达到53.6%;2030年,组织管理贡献度继续降低,但仍在CO₂、CO减排方面占近60%,技术进步子情景在NO_x、PM₁₀和HC减排方面贡献较大,分别为65.5%、48.1%和57.7%,能源结构的贡献度有所增长,较前期显著。

表3 综合减排情景中各子情景减排贡献度比较

Tab.3 Comparison of emission reduction contribution rate of each sub scenarios in comprehensive mitigation scenario

污染物	子情景	综合减排情景中各子情景减排贡献度/%		
		2015年	2020年	2030年
CO ₂	子情景3(技术进步)	26.3	27.7	31.9
	子情景4(组织管理)	68.5	66.5	58.6
	子情景5(能源结构升级)	5.2	5.8	9.6
CO	子情景3(技术进步)	18.1	24.1	31.2
	子情景4(组织管理)	84.1	70.4	58.6
	子情景5(能源结构升级)	-2.2	5.5	10.3
NO _x	子情景3(技术进步)	17.5	53.6	65.5
	子情景4(组织管理)	82.4	46.2	34.4
	子情景5(能源结构升级)	0.1	0.2	0.1
PM ₁₀	子情景3(技术进步)	14.5	24.8	48.1
	子情景4(组织管理)	81.4	69.3	38.6
	子情景5(能源结构升级)	4.1	5.8	13.4
HC	子情景3(技术进步)	17.1	37.3	57.7
	子情景4(组织管理)	82.6	59.7	36.5
	子情景5(能源结构升级)	0.3	3.0	5.8

3.3.2 子部门减排贡献度

道路运输行业四个子部门对 CO₂ 和污染物减排贡献程度差异显著. 表 4 比较了各个部门的 2012~2030 年 18 年间累计减排贡献度,即各个部门累计减排量占总累计减排量的比例. 公路营运货车对道路运输行业节能减排效益贡献率最高,均为 90%左右,明显高于 2012 年公路营运货车能耗和排放占总比重的 68%~86%. 由此可见,公路货运子部门是道路运输行业节能减排任务的重中之重,具有巨大的减排潜力.

表 4 综合减排情景子部门累计减排贡献度

Tab. 4 Comparison of cumulative emission reduction contribution rate of each sub sectors in comprehensive mitigation scenario %

部门	子部门	减排贡献度				
		CO ₂	CO	NO _x	PM ₁₀	HC
城市 客运	出租车	4.19	2.95	0.48	0.62	0.64
	公共汽(电)车	1.93	3.38	2.77	1.60	3.20
公路 运输	公路货车	91.79	86.76	89.34	92.17	88.95
	公路客车	2.09	6.90	7.41	5.61	7.21

4 结语

基于 LEAP-Tran 的情景分析结果表明,中国道路运输行业 2012~2030 年间仍然处于快速发展阶段,在技术、结构和组织管理方面具有巨大的减排潜力. 综合减排情景下多项减排措施的有效实施可以实现大幅度的减排效益,特别是主要大气污染物排放将会呈现稳定或大幅下降态势. 但对 CO₂ 消减量仍无法抵消由道路交通活动水平提升带来的排放增加,各个情景中 CO₂ 排放在 2030 年前难以达到峰值.

为了促进我国道路运输行业低碳化绿色化转型,综合政策措施的科学制定和有效实施是挖掘其巨大节能减排潜力的前提. 制定减排措施战略需要考虑不同措施不同目标的实施效果,组织管理措施实施对 CO₂ 减排以及污染物短期减排效果显著,相应措施包括建设现代化物流体系、报废黄标车辆、税费政策等. 中长期减排依赖于技术的进步,特别是机动车尾气排放因子的降低可以大幅减少污染物排放,其产生的空气质量改善效益不可估量. 能源结构升级措施在分析期限内减排效果欠佳,但随着科技进步和理念的深入人心,减排贡献度势必会逐渐提升,应作为未来减排潜力挖掘的重要措施储备. 从部门减排视角而言,公路货运是我国道路运输行业最

为主要的能耗和排放部门,政府应将其视为未来节能减排工作的主战场,对其制定和实施更多的政策措施,如节能改进、推广生态驾驶等. 综上所述,我国道路运输行业正处于面向“新常态”转型的发展期,近期应充分发挥正协同效应强、见效快的组织管理类措施的减排潜力,进一步优化组织模式,建立物流信息平台,促进货运行业低碳化绿色化发展. 同时还需制定和实施更为严格的燃油经济性标准和尾气排放标准,注重新能源汽车、清洁能源等技术的研发推广,为未来道路运输行业长期的低碳节能发展提供动力.

在本文的研究基础上,可进一步研究各个子情景中具体措施的减排效果,定量分析其成本和效益,综合评价情景实现的可能性和难点. 此外,碳排放权交易和污染物排放权交易政策也是新时期道路运输行业节能减排转型发展的重要措施,值得深入探讨.

参考文献:

- [1] Le Quéré C, Peters G P, Andres R J, *et al.* Global carbon budget 2013[J]. *Earth System Science Data*, 2014, 6(1):235.
- [2] Wang C, Cai W, Lu X, *et al.* CO₂ mitigation scenarios in China's road transport sector[J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48(7):2110.
- [3] Park N, Yun S, Jeon E. An analysis of long-term scenarios for the transition to renewable energy in the Korean electricity sector[J]. *Energy Policy*, 2013, 52:288.
- [4] 张颖,王灿,王克,等. 基于 LEAP 的中国电力行业 CO₂ 排放情景分析[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2007, 47(3):365. ZHANG Ying, WANG Can, WANG Ke, *et al.* CO₂ emission scenario analysis for China's electricity sector based on LEAP software[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2007, 47(3):365.
- [5] 王克,王灿,吕学都,等. 基于 LEAP 的中国钢铁行业 CO₂ 减排潜力分析[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2006, 46(12):1982. WANG Ke, WANG Can, LÜ Xuedu, *et al.* Abatement potential of CO₂ emissions from China's iron and steel industry based on LEAP[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2006, 46(12):1982.
- [6] Özer B, Görgün E, İncecik S. The scenario analysis on CO₂ emission mitigation potential in the Turkish electricity sector: 2006 - 2030[J]. *Energy*, 2013, 49:395.
- [7] Sritong N, Promjiraprawat K, Limmeechokchai B. CO₂ mitigation in the road transport sector in thailand: Analysis of energy efficiency and bio-energy[J]. *Energy Procedia*, 2014, 52:131.
- [8] Shabbir R, Ahmad S S. Monitoring urban transport air pollution and energy demand in Rawalpindi and Islamabad using leap model[J]. *Energy*, 2010, 35(5):2323.
- [9] Sadri A, Ardehali M M, Amirnekoee K. General procedure for

- long-term energy-environmental planning for transportation sector of developing countries with limited data based on LEAP (long-range energy alternative planning) and EnergyPLAN[J]. *Energy*, 2014, 77: 831.
- [10] 彭彬彬, 杜慧滨, 马寿峰, 等. 基于 LEAP 模型的道路机动车能耗及排放[J]. *武汉理工大学学报: 信息与管理工程版*, 2014, 36(5): 654.
- PENG Binbin, DU Huibin, MA Shoufeng, *et al.* Energy consumption and emissions of road vehicles based on LEAP [J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Information & Management Engineering*, 2014, 36(5): 654.
- [11] 周健, 崔胜辉, 林剑艺, 等. 基于 LEAP 模型的厦门交通能耗及大气污染物排放分析[J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(11): 164.
- ZHOU Jian, CUI Shenghui, LIN Jianyi, *et al.* LEAP based analysis of transport energy consumption and air pollutants emissions in Xiamen City [J]. *Environment Science & Technology*, 2011, 34(11): 164.
- [12] 于灏, 杨瑞广, 张跃军, 等. 城市客运交通能源需求与环境排放研究——以北京为例[J]. *北京理工大学学报: 社会科学版*, 2013, 15(5): 10.
- YU Hao, YANG Ruiguang, ZHANG Yuejun, *et al.* Study on the energy demand and environmental emissions of urban transport: A case study of Beijing [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology: Social Sciences Edition*, 2013, 15(5): 10.
- [13] LI Ye, BAO Lei, BAO Jin. Evaluating the emission mitigation potential of Shanghai transportation policies using LEAP model [C/CD]//Transportation research board 93rd annual meeting. Washington D C: Transportation Research Board, 2014: 14-3510.
- [14] Schipper L, Marie-Lilliu C. Transportation and CO₂ emissions: Flexing the link—a path for the World Bank[M]. Washington D C: The World Bank, 1999.
- [15] Vinod T. ADB sustainable development working paper series [R]. Manila: Asian Development Bank, 2009.
- [16] 国家环境保护总局科技标准司. HJ/T 180—2005 城市机动车排放空气污染物测算方法[S]. 北京: 国家环境保护总局, 2005.
- Standard of Science and Technology Department, the Environmental Protection Ministry of China. HJ/T 180—2005 Method for estimation of air pollution from vehicular emission in urban area [S]. Beijing: The Environmental Protection Ministry of China, 2005.
- [17] 国家发展和改革委员会能源研究所课题组. 中国 2050 年低碳发展之路能源需求暨碳排放情景分析[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- Energy Research Institute of National Development and Reform Commission. China's low carbon development pathway by 2050-scenario analysis of energy demand and carbon emissions [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [18] Global Fuel Economy Initiative (GFEI). Global fuel economy initiative-plan of action 2012-2015 [EB/OL]. [2015-12-04]. <https://www.iea.org/media/files/GlobalFuelEconomyInitiativePlanofAction20122015.pdf>.
- [19] 中华人民共和国国务院. 节能与新能源汽车产业发展规划 (2012—2020 年)[EB/OL]. [2015-12-04]. <http://www.miit.gov.cn/n11293472/n11505629/n11506426/n11515200/n11515446/n11926400/15116596.html>.
- The State Council of the People's Republic of China. Energy saving and new energy automobile industry development plan (2012—2020) [EB/OL]. [2015-12-04]. <http://www.miit.gov.cn/n11293472/n11505629/n11506426/n11515200/n11515446/n11926400/15116596.html>.
- [20] Cooper C, Kamakaté F, Reinhart T, *et al.* Reducing heavy-duty long haul combination truck fuel consumption and CO₂ emissions[R]. Boston: Northeast States Center for a Clean Air Future, 2009.
- [21] Phil G, Joyce D, Mark H. Elasticities of road traffic and fuel consumption with respect to price and income: A review[J]. *Transport Reviews*, 2004, 3(23): 275.
- [22] Burniaux J M, Chateau J. Mitigation potential of removing fossil fuel subsidies: A general equilibrium assessment[R]. Paris: OECD Publishing, 2011.