

城市客运交通能源需求与环境排放研究 ——以北京为例

于灏¹, 杨瑞广², 张跃军¹, 汪寿阳³

(1.北京理工大学 管理与经济学院 能源与环境政策研究中心, 北京 100081;

2.中国科学院 科技政策与管理科学研究所, 北京 100190; 3.中国科学院 数学与系统科学研究院, 北京 100190)

摘要: 基于 LEAP 模型框架构建北京市城市客运交通-能源-环境模型, 计算得到北京市 2020 年在不同政策情景下的能源需求趋势和常规大气污染气体及温室气体的环境排放变化趋势。研究认为: 在北京市对城市客运需求量逐渐增加的前提下, 大力发展公共交通尤其是轨道交通以及限制私家车的上升趋势势在必行; 同时, 改善终端利用层次的能源结构对于降低能源需求以及减缓大气污染压力具有重要作用。

关键词: 城市客运交通; LEAP 模型; 情景分析; 能源需求; 环境排放

中图分类号: F206; X24

文献标识码: A

文章编号: 1009-3370(2013)05-0010-06

在能源日益紧缺的情况下, 交通部门作为高能耗部门, 同样也带来了较高的环境排放。在交通运输活动中, 城市是运输网络的重要节点与中心, 城市交通是能源消耗和温室气体排放的大户。据世界银行预测, 2050 年世界人口将达到 90 亿, 其中 1/3 在中国和印度, 届时中国城市居民将超过 60%, 同样据预测, 到 2020 年城市居民出行将达到 9.517 亿人次, 包括 2.557 亿人次的公共交通和小汽车出行。由此可见, 在将来较长一段时期内, 伴随中国经济的稳定发展、机动车总量快速增长, 城市交通能源消费将持续快速增长。

北京作为国际型大都市, 随着社会经济的快速发展, 城市交通需求量也不断上升。2011 年北京交通行业总能耗 1.185 万吨标煤, 占全市总能耗的 16.9%, 如果加上私家车的能耗, 整个大交通的能耗达到 1.875 万吨标煤, 占全市总能耗的 26.8%。另外, 汽车污染占城市的大气污染比例在 60% 左右, 已经成为第一大污染源。因此, 交通部门能耗的增加进一步加大了污染物的排放。据统计, 北京机动车交通的 CO₂ 和 HC 分担率分别为 63.36% 和 73.54%, 尤其在非采暖期, 两者的排放分担率达 80% 左右。氮氧化物的排放分担率大约为 22%, 采暖期则达到 50%。根据有关部门初步统计, 目前汽车排放的污染气体对 PM_{2.5} 的贡献率在 22.2% 左右。

在运输能耗不断增加、能源相对短缺、环境屡

遭破坏的情况下, 优化交通发展模式, 发展节能型交通运输工具和清洁能源显得尤其重要。本文对未来北京市城市交通的发展进行预测分析, 以期制定更有效的政策措施。

一、文献综述

“长期能源替代规划”模型 (Long-range Energy Alternatives Planning System, LEAP) 是由瑞典斯德哥尔摩环境研究所及美国波士顿 Tellus 研究所共同研究开发的工具模型。该模型主要用于国家和城市中长期能源环境规划, 用来预测在不同驱动因素的影响下, 全社会中长期的能源供应与需求, 并计算能源在流通和消费过程中的大气污染物以及温室气体排放量。

LEAP 模型所研究的问题相当广泛, 目前已经应用于全球 150 多个国家和地区。

对行业或部门用能及排放的研究。首先, LEAP 模型广泛应用于交通部门能源及大气污染物预测。黄成^[1]以上海为例, 应用 LEAP 模型, 研究了在确保交通需求增长的前提下, 发展不同的交通出行方式对能源需求和大气污染物排放的影响。徐才华^[2]利用 LEAP 模型, 参照中国目前正在实施或计划实施的各项交通能源政策, 建立了四种情景, 分析了各种情景的节油、减排效果, 以及各种情景下 2005—2020 年各年份的汽油、柴油消耗量和污染物排放

收稿日期: 2013-04-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (71001008, 71273028, 71020107026); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20101101120041); 北京市优秀人才培养资助计划项目 (2011D009011000008)

作者简介: 于灏(1988—), 女, 博士研究生, E-mail: yuhao1112@126.com

量。周健^[3]应用 LEAP 模型研究了厦门市城市交通部门,设定了基准情景以及最佳情景,结果对比分析了 2030 年最佳情景与基准情景的节能和环境排放情况。Shabbir^[4]同样对拉瓦尔品第和伊斯兰堡的交通部门的能源需求和污染物排放设置情景对城市交通政策的影响进行研究。其次,LEAP 模型也被应用于其他部门。如黄建^[5]利用 LEAP 模型,设立强电气化情景、基准情景以及弱电气化情景对中国电力需求进行情景分析,结果表明:未来我国电力需求将经历先快速增加后缓慢增长的过程。王克^[6]通过建立 LEAP China 模型模拟了三个不同情景下中国钢铁行业 2000—2030 年 CO₂ 排放量及相应的减排潜力。

对规划问题的研究。Shin^[7]利用 LEAP 模型研究了韩国的垃圾填埋气的发展战略规划,并比较了不同情境下各个战略的成本问题。戴彦德^[8]是国内较早利用 LEAP 模型从事中国能源环境情景分析研究的,以整个社会发展规划和各个产业部门的发展规划为基础,设定不同情景,展示未来我国社会经济发展、能源以及环境等方面之间可能出现的各种情况。

对不同能源品种的研究。Limmechokchai 和 Chawana^[9]利用 LEAP 模型建立了泰国农村地区居民炊事用能的炉灶和生物沼气发展战略,并结合 AHP 方法对不同的情景之间进行比较和分析。迟春

洁^[10]应用情景分析法和 LEAP 模型对未来中国可供选择的能源供需前景进行研究,得出为实现能源可持续发展战略须提高能源效率和优化能源结构。

针对北京的交通能源及排放问题,国内学者已经展开了一定的研究。朱松丽^[11]应用 LEAP 模型预测了北京市 1998—2020 年城市交通能源需求和污染物排放,并提出了相应建议。董军^[12]应用计量经济学软件以及 LEAP 模型预测了 2015 年北京市城际间客运交通的能源需求量和主要污染物的环境排放量,并分析了预测结果。

本文在以上文献基础上,以北京市城市客运交通为研究对象,通过设置不同情景,利用 LEAP 模型研究北京市现阶段的城市交通规划、政策以及新型交通工具对北京市客运交通部门的能源需求与环境排放的影响,以期得到有利于优化北京市客运交通的建设性结论和意见。

二、研究方法

(一)部门划分

城市交通是指除航空、铁路和水运之外的城市公交、出租、道路运输和民用车辆等服务城市运行的交通部门,本文的分析对象为北京市城市客运交通。依照 LEAP 模型的构架要求,结合各种数据的可获得性,将北京市城市客运交通分解为四个层次:部门、子部门、终端利用和设备,如表 1 所示。

表 1 北京市城市客运交通部门层次划分

部门	子部门	终端利用	设备
客运交通	公共交通	公交车 地铁	汽油、柴油、CNG、LPG、电 电
	个体交通	社会及私人汽车 出租车	汽油、柴油、CNG、LPG 汽油、CNG、LPG

注:CNG 为压缩天然气(Compressed natural gas)缩写;LPG 为液化石油气(Liquefied petroleum gas)缩写。

(二)客运周转量计算

城市公共交通主要包括大容量的不同类型交通工具,比如公交车以及城市轨道交通。城市个体交通包括小轿车与大客车(私人拥有、社会团体以及出租车)。两者客运周转量的计算公式不同。实践证明,一个地区的经济发展离不开该地区交通运输业的支持^[13],因此,本文选取人均 GDP 作为驱动因子。

对于公共交通,利用客运量(人次)和旅客的平均乘距(km)来计算客运周转量,公式为

$$PK^p = \text{Trip}_t * \text{DIS} \quad (1)$$

其中,PK^p 为第 t 年的公共交通客运周转量(人·km);Trip_t 为第 t 年的客运量(人次);DIS 为旅客的

平均乘距(km)。

对于个体交通,利用不同类型机动车保有量、平均载客量以及年平均运营距离等数据计算客运周转量,公式为

$$PK^i_{kt} = V_{kt} * U_k * O_k \quad (2)$$

其中,PKⁱ_{kt} 为第 t 年第 k 种终端利用个体交通客运周转量(人·km);V_{kt} 为第 k 种终端利用在第 t 年的保有量(辆);U_k 为第 k 种交通工具的年平均运营距离(km);O_k 为第 k 种交通工具的平均载客数。

建立 1995—2011 时间区间内北京市客运周转量(亿人·km)与人均 GDP(元/人)的回归,得到系数如表 2 所示。根据人均 GDP 的时间序列预测出 2020 年的人均 GDP,从而得到 2020 年北京市城市

客运交通的周转量。

表2 客运周转量回归系数

参数	系数	t	P值
C	-71 855	-8.71	0.013**
ln P GDP	7 033	8.99	0.012**

注: $R^2=0.976$; **表示达到5%显著水平。

(三) 能源消费

不同类型的机动车辆的能源消费是通过每百公里能耗、能源密度以及载客量进行计算得出

$$ED_{ki}=FC_{ki} \cdot \rho_i / PQ_k / 100 \quad (3)$$

其中, ED_{ki} 为第 i 种能源 k 种终端利用的能源消费, 单位为 $\text{kg}/(\text{人} \cdot \text{km})$; FC_{ki} 为第 i 种能源 k 种终端利用的每百公里能耗, 单位为 $\text{L}/100\text{km}$; ρ_i 为第 i 种能源的密度, 单位为 kg/L ; PQ_k 为第 k 种终端利用的载客量, 单位为人。

(四) 环境排放

排放强度在本文中是指,各部门的终端利用层次所使用的不同种能源技术消耗 1kg 相应的能源所产生的环境排放。根据北京市汽车排放污染物贡献率的多少,环境排放重点研究 CO , HC , NO_x , CO_2 。其中,在终端利用层次中,所使用的电能可以实现污染气体的“零排放”,不计在环境排放中。

(五) 情景设定

1. 基准情景

基准情景,又称“零方案”,是指未采取进一步的节能减排政策和措施,沿袭2011年各终端利用层的服务量(客运周转量)的比例,但是各部门的服务量随着经济的发展而有所增长。

2. 政策情景

政策情景综合考虑了北京城市交通规划以及相关政策措施、技术进步等对客运交通可能产生的影响,情景描述及参考依据如表3所示。

表3 政策情景的定量化情景描述及参考依据

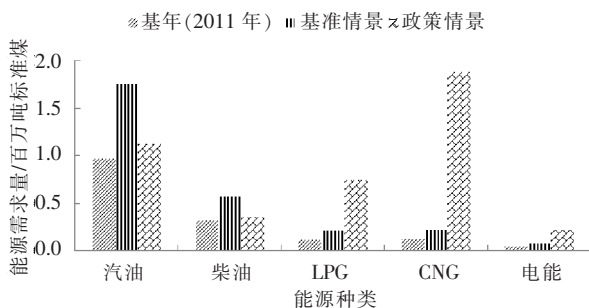
层次	情景描述	参考依据
子部门	子部门中公共交通的服务量比例上升,到2020年比例达到45%	《北京市“十二五”时期交通发展建设规划》、《关于优先发展城市公共交通若干经济政策的意见》、《关于进一步推进首都交通科学发展加大力度缓解交通拥堵工作的意见》
终端利用	公共交通内部,轨道交通的服务量所占比例逐年上升,到2020年比例达到55%;个体交通中,社会及私人用车的服务量比例呈缓慢下降趋势	《北京市“十二五”时期交通发展建设规划》、《北京市小客车数量调控暂行规定》、北京交通拥堵方案拟进一步控制小客车过快增长、机动车尾号限行及摇号等措施
设备	设备的服务量所占比例调整如下:LPG、CNG和纯电动公交车比例逐渐上升,柴油公交车逐年下降;新能源私家车服务量比例上升;CNG出租车比例从无到有	《节能与新能源汽车产业发展规划》、加大对清洁能源公交车的投资力度等

三、结果分析

(一) 能源需求

1. 不同种能源需求

与基年(2011年)相比,由于各部门客运周转量的增加,基准情景与政策情景下的能源需求量均有显著的增加,如图1所示。



注:为了数据显示清楚了,图中汽油的单位为实际数据的1/10。

图1 不同种能源标准煤需求量

汽油在北京市城市交通的能源结构中占主导

地位,2011年,汽油比重占到能源总量的94.14%,而按照预测,汽油比例在下降,在政策情景下汽油的比重占能源总量的77.77%。而柴油在基准情景和政策情景下的变化不大,保持在3%左右。LPG、CNG和电能的比例都有大幅度上升,分别从基准情景的1.16%、1.21%、0.42%上升到政策情景的5.18%、13.05%和1.52%。

总量上,基准情景下的能源需求总量为19.44百万吨标煤,而政策情景下为16.83百万吨标煤,下降13.43%。所以,能源效率的提高和能源结构的改善在一定程度上缓解了城市交通能源需求的过快增长。

2. 分部门能源需求

公共交通和个体交通两个子部门在不同情景下的不同种能源需求比例情况如图2所示。

公共交通内部,柴油使用量比例从基准情景的18.57%下降到政策情景的6.92%;电能和CNG的使用比例均有所上升,分别从73.00%和0.59%增加到政策情景的81.69%和5.50%。并且,电能在公共交通内部的比例一直占据主导地位,在政策情景下,

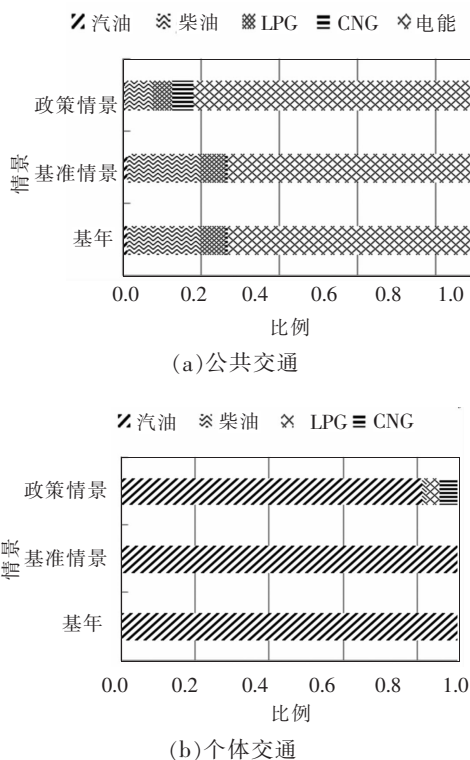


图2 子部门的能源需求

其他种类能源的所占比例比较均匀。

个体交通内部,虽然3种情况下,汽油的使用量都是最大,但政策情景下的比例相较于基准情景下降14.71%。LPG和CNG所占比例均有所上升,政策情景下分别为3.53%和13.94%,相比基准情景增加3.66和6.90倍。

两个子部门在不同情景下的标准煤总量如图3所示,个体交通部门的能源需求比例在基准情景下为93.72%,而在政策情景下,由于有相关政策的影响,个体交通的能源需求比例下降到81.81%。

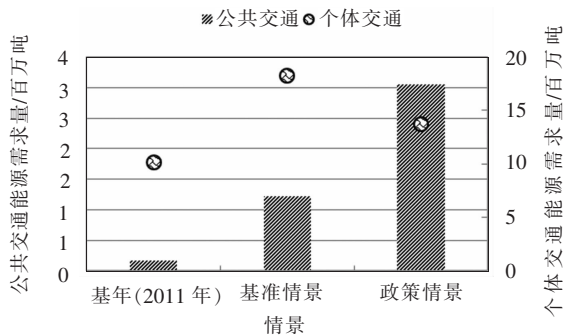


图3 子部门的标准煤需求量

3.终端利用层次能源需求

各终端利用层次在不同情景下的能源需求变化显著,如图4所示。由于地铁、纯电动公交车和无轨电车的耗电量均明显上升,使得电能的需求量,政策情景下比基准情景明显增加。电能的使用可以

实现污染气体的“零排放”,因此在环境排放方面会有所改善。

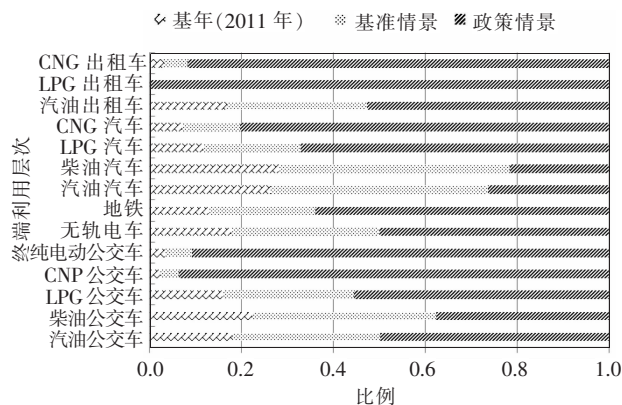


图4 终端利用层次能源需求

汽油方面的需求量,基准情景下的增长速度基本和客运周转量的增长速度匹配,政策情景下的水平也相差不多,个体交通中的汽油需求量明显有所下降,这是因为新能源汽车服务量的增加,降低了汽油汽车的使用。另外,由于公交车、私家车以及出租车中LPG和CNG车型的服务量的上升,导致政策情景下LPG和CNG的使用量大幅增加。因为公共交通中柴油公交车的淘汰以及个体交通中新能源汽车的比例上升,政策情景下柴油的需求量明显少于基准情景。柴油公交车用能变化不大,而柴油私家车却明显下降。

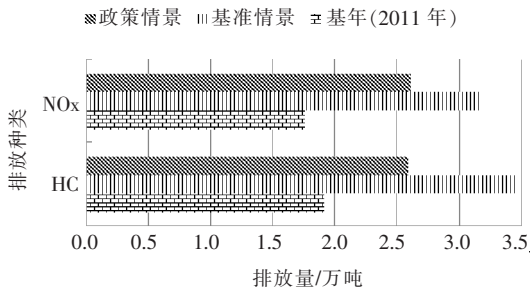
(二)环境排放

1.不同种类排放物排放量

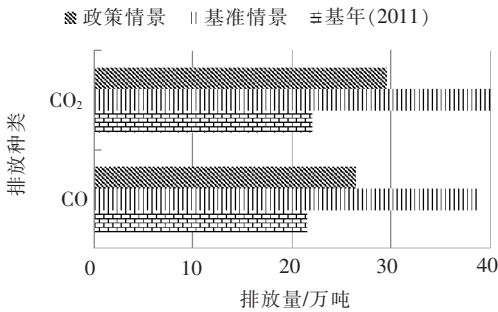
3种情况下不同种环境排放的情况如图5所示。2011年CO、HC、NO_x、CO₂的排放量分别为21.53万吨、1.92万吨、1.76万吨、2 210.68万吨,在基准情景下,相应的排放量为2011年的1.80倍,而在政策情景下,各排放物的排放量分别为26.55万吨、2.59万吨、2.62万吨、2 957.68万吨,分别是2011年的1.23、1.35、1.48、1.34倍,政策情景下的能源需求是2011年的1.63倍。所以,各种排放物的增长速度均低于能源消费的增长速度。出现这种情况的原因是,清洁能源车型的服务量比例上升,从而导致污染物或是温室气体的增长速度减慢,因此,鼓励清洁能源车的使用在减缓温室效应或是环境污染方面发挥作用巨大。另外,整体上政策情景下污染物、温室气体的排放量均明显低于基准情景。

2.分部门环境排放

公共交通与个体交通两个子部门的环境排放情况如图6所示。3种情况下公共交通的环境排放分别为39.19万吨、70.57万吨、108.97万吨,在政策情景中,公共交通的排放量所占比例比基准情景增



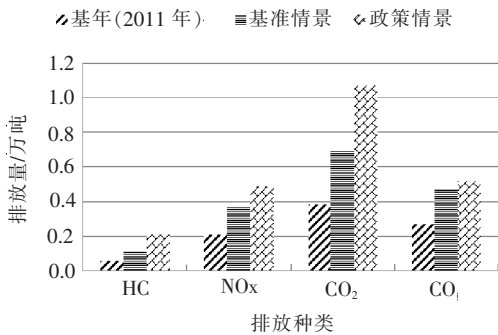
(a) NOx 和 HC 的排放情况



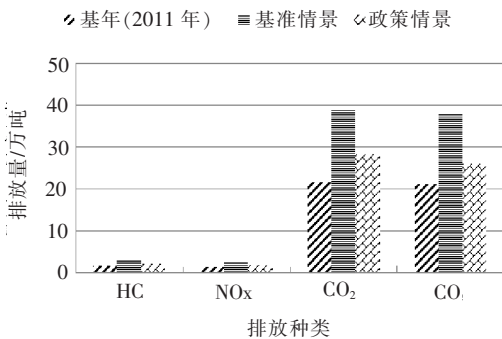
(b) CO₂ 和 CO 的排放情况

注:为了数据显示清楚了,图中 CO₂ 的数据为实际数据的 1/100。

图 5 不同种环境排放情况



(a) 公共交通环境排放



(b) 个体交通环境排放

注:为了数据显示清楚了,图中 CO₂ 的数据为实际数据的 1/100。

图 6 子部门环境排放情况

加 19.07%。在政策情景下的公共交通能源需求为 3.06 百万吨标煤, 占总能源需求的 18.18%, 而在 2011 年中, 公共交通的能源需求占总能源需求的

1.74%。虽然在设定政策情景时,增加了公共交通服务量所占的比例,但是该部门的环境排放的增长速度远低于能源需求的增长速度,因此,大力发展公共交通是未来城市发展的必然选择。个体交通中,4 种排放物在政策情景下较于基准情景都有明显降低,原因在于对终端利用层次的优化。

四、结论及政策建议

本文利用 LEAP 模型对北京市城市客运交通的能源需求与环境排放进行研究, 得出北京市 2020 年在不同情景下的能源需求与常规大气污染气体及温室气体的环境排放, 得出结论如下:

1. 总体来说, 随着北京市人均 GDP 的增加, 对城市交通的需求量会逐渐增加, 相应地, 能源需求量以及环境排放的压力都逐渐增大。研究结果显示, 2020 年能源需求是 2011 年的 1.89 倍。

2. 在政策情景中, 增加公共交通在城市客运交通中所占的比例, 但是通过结果发现公共交通的环境排放的增长速度远低于能源需求的增长速度, 所以, 大力发展公共交通尤其是轨道交通从减排的角度看是必须的, 能够很大程度地改善城市交通状况。

3. 个体交通部门客运周转量和能源需求量都呈现快速增长趋势, 在未来 20 年, 个体交通的发展将依然快于公共交通。根据模型显示的结果, 在基准情景下, 个体交通的客运周转量比重将达到 78%, 能源需求占到 93.72%, 污染物及温室气体的排放所占比例更大。

4. 能源结构的改善在一定程度上缓解了城市交通能源需求的过快增长, 比如在终端利用技术层次上, LPG、CNG 和电能交通工具的使用比例增加, 不仅降低了能源需求, 同时减缓环境压力。

根据以上结论, 提出以下政策建议:

1. 鼓励公共交通发展

通过分析可以得出, 个体交通的能耗和排放均远远超过公共交通, 而与纽约、伦敦等国际大都市相比, 北京公共交通系统还有待发展, 尤其需要在客流吸引力方面须做更多努力。所以要将北京建设成为一个国际型大都市, 大力发展公共交通, 尤其是轨道交通是必须的选择。因此要考虑北京市的规模和布局, 合理设计公共交通系统, 地铁和轻轨需要和公共汽车进行良好匹配, 以提高公共交通的总体效率和舒适性。

2. 限制个体交通

要降低北京市城市交通的能源需求增长速度

和改善大气质量,个体交通是重点。但从现状来看,针对个体交通的快速发展缺乏足够有效的应对措施和政策。应提高新车登记门槛,控制汽车总量,鼓励合乘出行。利用经济对策,如国际上普遍采用的在公共交通便利舒适的情况下,提高个体汽车的使用成本,如提高停车费。

3. 新能源、新技术应用

应进一步加大汽车行业中的新能源、新技术的研发力度,积极推进高性能、低污染、新能源公共汽车的研制开发。一些已经比较成熟的小汽车如低能耗柴油小汽车、混合动力汽车,不仅能减少排放,还能减少能源需求。政府应给予新能源配套设施建设以及财政支持,实现新能源规模化的使用,降低使用成本。

4. 促进新型柴油汽车发展

考虑到环境问题,北京对柴油汽车一直采取限制政策,但是从世界范围来看,新型柴油车的发展已经引起了各国的重视。加快新型柴油车的发展对降低城市交通能源需求、减少温室气体排放以及改善空气质量方面有很大的作用。因此,要加大技术研究的投入,加强与国际的合作,鼓励新型柴油车的发展,同时还要进行相关的基础设施建设,以便提供良好的服务。

5. 促进非机动车的发展

降低城市的机动车交通需求无疑是减少因交通引起的能源需求与环境问题的直接举措。非机动车曾是我国城市交通的特色,也是低碳交通的重要组成部分,建议在可持续城市交通政策框架中,给予充分重视,保护非机动车环境,合理发展非机动车交通。

参考文献:

- [1] 黄成,陈长虹,王冰妍,等. 城市交通出行方式对能源与环境的影响[J]. 公路交通科技,2005,22(11):163-166.
- [2] 徐才华. 中国交通能源需求与排放问题研究[D]. 北京:中国科学院科技政策与管理科学研究所,2007:1-80.
- [3] 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):164-170.
- [4] Shabbir R, Ahmad S S. Monitoring urban transport air pollution and energy demand in rawalpindi and islamabad using leap model [J]. Energy, 2010, 30(3): 403-412.
- [5] 黄建. 基于 LEAP 的中国电力需求情景及其不确定性分析[J]. 资源科学, 2012, 34(11): 2124-2132.
- [6] 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):1982-1986.
- [7] Shin H C, Parka J W, Kim H S, et al. Environmental and economic assessment of landfill gas electricity generation in Korea using LEAP model [J]. Energy Policy, 2005, 33(10): 1261-1270.
- [8] 戴彦德,朱跃中,刘志平. 2020 年中国能源需求情景分析[R]. 北京:发展与改革委员会能源研究所,2003.
- [9] Limmeechokchaia B, Chawana S. Sustainable energy development strategies in the rural thailand: the case of the improved cooking stove and the small biogas digester [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, 11 (5): 818-837.
- [10] 迟春洁,于灏,张弛. 基于 LEAP 模型的中国未来能源发展前景研究[J]. 技术经济与管理研究, 2004, 25(5): 73-74.
- [11] 朱松丽,姜克隽. 北京市城市交通能源需求和污染物排放:1988—2020 [J]. 中国能源, 2002(6): 26-31.
- [12] 董军,国方媛. 北京市城际间客运交通能源需求分析[J]. 水电能源科学, 2010, 28(7): 169-172.
- [13] 周大地,戴彦德. 2020 中国可持续能源情景[M]. 北京:中国环境科学出版社,2003.

Study on the Energy Demand and Environmental Emissions of Urban Transport —A Case Study of Beijing

YU Hao¹, YANG Ruiguang², ZHANG Yuejun¹, WANG Shouyang³

(1. Center for Energy and Environmental Policy Research, School of Management and Economics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Institute of Policy and Management, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China; 3. Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Based on LEAP model framework, the Beijing urban passenger transport-energy-environment model was established. Then, the changes in trends of energy demand and conventional air pollution gases and environmental emissions of greenhouse gases in different policy scenarios of Beijing were calculated in 2020. It points out that under the premise of Beijing's increasing demand for urban passenger transport, vigorously developing public transport, especially the rail transport, and restricting the upward development trend of private cars are imperative, while improving energy structure of the end-uses will play an important role in reducing energy demand and slowing the pressure on air quality.

Key words: urban passenger transport; LEAP model; scenario analysis; energy demand; environmental emissions

[责任编辑:孟青]