

小汽车外部污染成本研究

Study on External Air Pollution Costs by Usage of Cars

李可¹, 张戎²

(1.交通运输部规划研究院,北京 100028;2.同济大学交通运输工程学院,上海 201804)

Li Ke¹, Zhang Rong²

(1.Transport Planning and Research Institute, Ministry of Transport, Beijing 100028, China; 2. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

摘要: 通过研究并量化小汽车使用的外部污染成本,对于提高所有道路交通使用者的公平性,促进交通系统的可持续发展具有重要意义。首先总结分析了评估小汽车外部污染的现有模型;然后以影响路径法为理论基础,建立了小汽车外部污染健康成本测算方法。结合北京地区小汽车保有量、排放因子、年平均行驶里程等指标,计算了北京地区小汽车HC, CO, NO_x, PM₁₀, SO₂等污染物的年排放量,并运用医疗费用法和支付意愿法测算了2009年北京市小汽车排放的健康成本。结果显示,2009年北京市小汽车污染导致的健康总成本为6.48亿元,占GDP总量的0.055%,占小汽车使用成本的1.84%。

Abstract: Research on quantitative air pollution cost by cars helps significantly for enhancing the fairness for all roadway users, and for promoting the sustainable development of transport system. The paper first analyzes the models for the car pollution cost estimation; and then based on the impact pathway approach, introduces a method for calculating the external pollution cost of cars. Finally, this paper provides the methods of measuring the annual emission of HC, CO, NO_x, PM₁₀, SO₂ from cars in Beijing by using the various indicators such as car volume, emission factors and average annual vehicle mileage of cars and taxis. The healthy problem caused by cars emissions in 2009 in Beijing is calculated in using the medical cost approach and the willingness to pay methods. The results show that the total health cost of the car pollution in Beijing in 2009 is 684 million yuan, which accounts for 0.055% of the total GDP, and 1.84% of the cost of car usage.

关键词: 交通运输经济;小汽车污染成本;影响路径法;健康成本
Keywords: transport economy; car pollution cost; impact pathway model; cost of healthy

中图分类号: U491.9²

文献标识码: A

收稿日期: 2011-09-13

作者简介: 李可(1986—),女,河南邓州人,硕士,助理工程师,主要研究方向:城市交通规划、运输经济。

E-mail:like@tpri.gov.cn

近年来,中国汽车产业飞速发展,在民用汽车保有量中,小汽车所占比例持续上升,从1990年的11%增至2000年的30%,2009年达到64%^[1]。小汽车保有量持续快速增长首先得益于社会经济发展、居民收入水平提高和鼓励发展汽车产业的政策,另一方面则是由于没有充分考虑小汽车使用的外部成本。随着城市机动化水平的不断提高,小汽车排放的污染物已成为影响城市环境质量的主要污染源。如何在快捷性、经济性、环境保护之间维持平衡并衡量其权重,有必要从定性及定量角度分析小汽车使用的外部污染成本,这对于提高所有道路使用者的公平性、促进城市交通系统的可持续发展也具有重要意义。

1 小汽车外部污染影响因素及危害

小汽车的污染排放量及其对城市环境的影响程度取决于多种因素。单车的尾气排放量取决于车辆类型及车辆特征,如车龄、车况、车辆尺寸、驱动模式、发动机大小和结构性能、加装的尾管排气净化装置、燃料类型和相关的燃烧技术等。车辆的行驶状况、使用方式等也会影响其排放,如车辆在道路上的

行驶速度、地理位置与地形条件等。在城市中，小汽车频繁加速、刹车、换挡等会产生更多的污染物。从宏观角度看，小汽车总污染物排放量由小汽车保有量、单车排放量与车辆总行驶里程共同决定。城市交通环境工程与城市交通控制管理技术的规划、实施程度，以及城市的政策法规和政策导向都会导致整个城市小汽车排放的污染物总量产生差异。

小汽车排放的污染物及其危害是多方面的。可吸入颗粒物(PM₁₀, PM_{2.5})、氮氧化物(NO_x)、二氧化硫(SO₂)、臭氧(O₃)及挥发性有机化合物(VOC)等会使人类健康受损甚至寿命缩短，同时会损害建筑物、破坏生态系统，并给农业带来损失。对人类健康的损害是目前小汽车污染物排放最主要的影响类别，也是本文的重点评估对象。小汽车排放导致空气污染尤其是HC, NO_x, CO和PM_x浓度上升，使得呼吸道疾病是城市居民仅次于心血管疾病的第二致死疾病。城市道路两侧空气污染物浓度严重超标，高浓度的CO, NO_x一般出现在城市主要道路两侧和交通密集区，驾驶人、交警、乘车者、骑车者、行人等人群长期处于空气污染严重的环境。

2 小汽车外部污染健康成本测算方法

为了研究小汽车排放产生的健康成本，建立基于影响路径法的小汽车外部污染健康成本测算方法。根据欧盟对交通运输外部成本的研究^[2]，影响路径法的主要阶段分为：构建排放模型和空气扩散模型，运用暴露—反应函数分析污染物的物理影响，最后估算影响的货币价值，见图1。根据小汽车外部污染现状，将影响路径法加以简化和改进，计算由小汽车使用产生的外部污染成本及相关费用，其流程见图2。

图2左边一栏简单定义了从交通周转量到与交通有关的空气污染成本的量化步骤及因果关系；右边一栏假设因果链的简化可通过四个因素间的线性关系表示。

排放因子用来衡量CO, SO₂, NO_x, PM_x, HC等污染物的排放。本文对具体的车辆技术不做深入探讨，仅用小汽车综合排放因子进行替代。

小汽车污染排放量计算的关键是获取小汽车行驶里程和排放因子，其中行驶里程与出行总量、小汽车出行比例及人均出行距离等密切相关。某类型车辆污染排放量的一般计算公式^[3]为

$$EQ_p = \frac{1}{100} \sum P M E F_{p,j}, \quad (1)$$

式中：EQ_p为p类型车辆的污染排放量/t，p为车型分类；P为计算年机动车保有量/万辆；M为年均行驶里程/万km；EF_{p,j}为p类车型j种污染物的单位里程平均排放因子/(g·km⁻¹)。由于小汽车年均行驶里程的数据难以获得，根据式(1)推导出计算小汽车某种污染物排放量的简化公式：

$$E_{c,j} = \frac{N \cdot F_c \cdot M T_c}{100 L_c \cdot P R_c} \cdot E F_{c,j}, \quad (2)$$

式中：E_{c,j}为小汽车j种污染物的排放量/t；N为居民年出行总量/万人次；F_c为小汽车出行比例/%；MT_c为使用小汽车出行的人均出行距离/km；EF_{c,j}为小汽车排放j种污染物的单位里程平均排放因子/(g·km⁻¹)；L_c为小汽车的满载率/%；PR_c为小汽车的额定载客量。

暴露因子代表了排放因子和暴露人群之间的

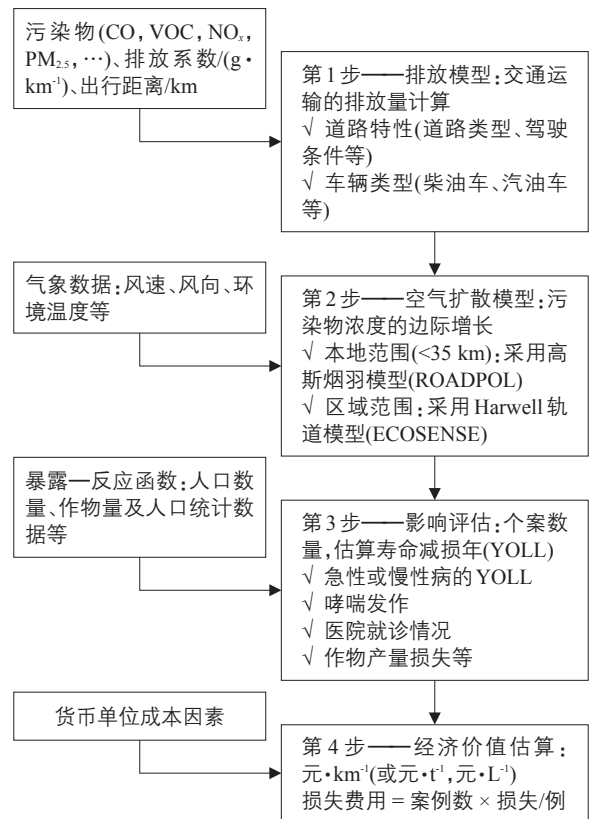


图1 影响路径法理论模型

Fig.1 Impact pathway model

关系。暴露因子确定后,要建立污染物的暴露—反应函数。一般来说,在污染物浓度低时,环境污染对人类健康的危害基本可以忽略,当污染物浓度达到一定数值时危害才开始出现,此浓度即为污染危害的阈值。达到阈值以后,污染危害随着污染物浓度的增加而加大。经典的空气污染与人类健康的暴露—反应关系如图3所示, E_0 代表清洁条件下即污染物浓度小于基线浓度 C_0 时,人群的健康效应;当污染物浓度 C 超过基线浓度时,符合该曲线的人群健康效应为 E 。

健康问题十分复杂,大多数疾病都是由多种因素综合导致。尽管汽车尾气是导致呼吸道疾病和心血管疾病发病率和死亡率上升的重要因素,但是单从疾病本身却难以判断其是否由小汽车排

放的污染物所致。因此,计算健康损害需采用“自上而下”的分析方法。本文建立的健康损害评估模型首先计算所有相关污染物导致的健康损害,然后再由小汽车排放的相关污染物占总污染物的比例,计算小汽车排放导致的健康损害。计算空气污染健康损害的一般公式^[4]为

$$P_{di} = (f_{pi} - f_{ii})P_C, \quad (3)$$

计算小汽车污染排放导致的健康损害公式则为

$$P_{cdi} = P_{di} \sum (E_{c,j} / E_j), \quad (4)$$

式中: P_{di} 是由污染造成的健康损害数量(过早死亡人数、住院人数、发病人数等); f_{pi} 为污染条件下健康损害终端 i 的年发生率(如住院率、门诊率等); f_{ii} 为健康损害终端 i 的基线,即清洁条件下健康损害终端 i 的年发生率; P_C 为暴露人口; P_{cdi} 为小汽车污染排放造成的健康损害数量; E_j 为城市范围内 j 种污染物的总排放量/t。 f_{pi} 和 f_{ii} 可由健康损害的一般表达式得出,即

$$f_{pi} = f_{ii} \exp(\Delta c_i \beta_i / 100), \quad (5)$$

$$f_{ii} = f_{pi} / \exp(\Delta c_i \beta_i / 100). \quad (6)$$

在 β_i 值较小时, $\exp(\Delta c_i \beta_i / 100) \approx 1 + \Delta c_i \beta_i / 100$, 则

$$f_{pi} = f_{ii} (1 + \Delta c_i \beta_i / 100), \quad (7)$$

$$f_{ii} = f_{pi} / (1 + \Delta c_i \beta_i / 100), \quad (8)$$

式中: β_i 为回归系数,即暴露—反应系数,表示污染物质量浓度每变化 $1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 健康损害 i 变化的百分数,即上文所说的暴露—反应关系; Δc_i 为实际空气污染物的质量浓度与损害健康的空气污染物的质量浓度阈值之差/ $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ 。

$$\Delta c_i = c_{pi} - c_{ii}, \quad (9)$$

式中: c_{pi} 为暴露区实际空气污染物的质量浓度/ $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$; c_{ii} 为损害健康的空气污染物的质量浓度阈值。

环境资源通常没有价值,不能直接用价格计量,正如空气污染对人类健康的损害。因此,本文采用医疗费用法评估各种疾病的成本;采用支付意愿法估算污染导致的死亡成本。医疗费用法是通过治疗疾病花费的费用来计量患病造成的直接经济损失,包括治疗费用、住院费用、病人和陪护人员的工作日损失费用等。支付意愿法通过评估统计生命价值,估算人类的死亡成本。统计生命价值是指每个人为降低死亡风险愿意支付的

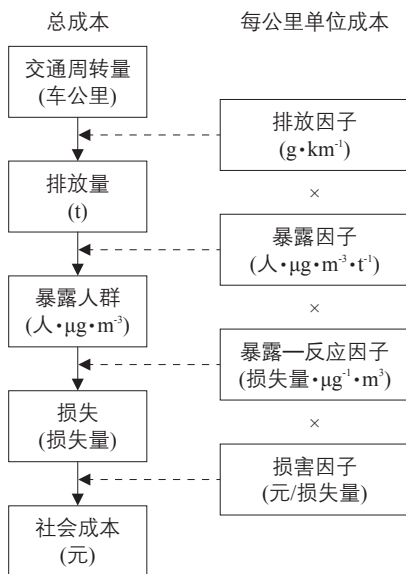


图2 空气污染造成的人类健康成本评估模型

Fig.2 Model for evaluating human health cost due to the air pollution

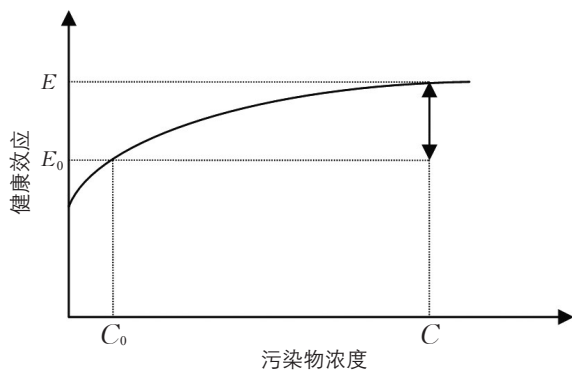


图3 空气污染与人体健康效应的暴露—反应关系

Fig.3 Exposure - response function of air pollution and human health effects

金额，这些金额相加就相当于一个统计生命。

3 北京市小汽车外部污染健康成本测算

与世界大城市机动化发展历程进行对比可以发现，北京市机动车特别是私人小汽车发展存在高速度增长、高强度使用、高密度聚集等特点^[5]。测算北京市小汽车外部污染的健康成本，有利于引导出行者选择合适的交通方式、避免不必要的出行，有利于政府制定相关政策、措施，控制小汽车发展，从而降低其对环境的负面影响，建设可持续发展的交通系统。

针对北京市实际情况，对式(1)中的各参数进行赋值。根据对不同排放标准机动车排放因子的研究结果^[6]，选取小汽车排放中的HC，CO，NO_x，PM₁₀，SO₂的排放因子，其值分别为EF_{C,HC}=2.44 g·km⁻¹，EF_{C,CO}=17.6 g·km⁻¹，EF_{C,NO_x}=1.12 g·km⁻¹，EF_{C,PM₁₀}=0.02 g·km⁻¹，EF_{C,SO₂}=0.01 g·km⁻¹。2010年北京市居民日出行总量达到3 500万人次，年出行总量1 277 500万人次。居民出行构成中(不含步行)，公共交通(地铁+公共汽(电)车)出行占40.8%；私人小汽车32.7%，出租汽车6.9%，即F_c=39.6%；自行车16.3%^[7]；其他方式10%^[7]。私人小汽车人均出行距离为24 km·人⁻¹·次⁻¹，平均载客量1.26人·次⁻¹，若满载量为5人，满载率约为0.25；出租汽车日均载客人数30人，平均载客人数(不含驾驶人)1.5人·次⁻¹，人均出行距离10.0 km·人⁻¹·次⁻¹，若满载量以4人计，满载率为0.375^[8]。将所需参数代入式(1)，得出北京市小汽车每年排放HC 19.2万t，CO 138.0万t，NO_x 8.8万t，PM₁₀ 0.16万t，SO₂ 0.08万t。

根据已有文献对北京市空气污染的研究成果，采用文献[9]的健康影响终端暴露—反应系数及标准差，以PM₁₀和SO₂为例，给出其相关系数和标准差，见表1和表2。

根据“世界卫生组织关于颗粒物、臭氧、二氧化氮和二氧化硫的空气质量准则”^[10]及2009年北京市环境状况公报^[11]，得到有关污染物的阈值标准及北京地区相关污染物的实际浓度值。根据北京地区的实际情况对式(3)中的相关指标进行赋值，得到ΔC_i，见表3。

北京地区所有污染物中，CO，PM₁₀，SO₂，NO_x的ΔC_i较大，对人体健康的影响也较为严重，而小汽车排放恰恰是这几种污染物的主要来源。根据已有的暴露—反应关系及相关卫生统计数据，实际中主要计算死亡率、心脑血管疾病和呼吸系统疾病住院率、心脑血管疾病和呼吸系统疾病门诊率、慢性呼吸系统疾病及其中慢性支气管炎的患病率/发生率。

根据2010年中国卫生统计年鉴，可知北京地

表1 PM₁₀的健康影响终端暴露—反应关系

Tab.1 Exposure - response function of the health effect of PM₁₀

健康影响终端	系数/%	标准差
全因死亡率	0.03	0.01
心脑血管疾病死亡率	0.02	0.008
呼吸系统疾病死亡率	0.06	0.02
门诊人次	0.012	0.004
小儿科门诊人次	0.05	0.02
内科门诊人次	0.03	0.01
急诊人次	0.01	0.01
住院人次	0.11	0.015
心脑血管疾病住院人次	0.07	0.02
呼吸系统疾病住院人次	0.12	0.03
慢性呼吸系统疾病	0.48	0.02

表2 SO₂的健康影响终端暴露—反应关系

Tab.2 Exposure - response function of the health effect of SO₂

健康影响终端	系数/%	标准差
全因死亡率	0.04	0.01
心脑血管疾病死亡率	0.04	0.01
呼吸系统疾病死亡率	0.06	0.02
门诊人次	0.02	0.01
小儿科门诊人次	0.08	0.03
内科门诊人次	0.05	0.02
急诊人次	0.04	0.01
住院人次	0.21	0.066
心脑血管疾病住院人次	0.19	0.04
呼吸系统疾病住院人次	0.17	0.04

表3 2009年北京市空气中主要污染物年均浓度值

Tab.3 Average concentrations of major air pollutants in Beijing, 2009

污染物类型	C _{ti}	C _{pi}	ΔC _i
NO _x	40	53	13
PM ₁₀	20	121	101
CO	1 000	1 610	610
SO ₂	20	34	14

区空气污染相关疾病的年发生率；根据文献[9]提供的不同污染物产生的健康影响终端的回归系数 β_i ，代入式(8)，可计算出清洁条件下相关疾病的年发生率。北京市小汽车排放对空气污染的影响率超过36%，占道路运输空气污染总影响率的64%左右^[12]。根据北京市常住人口数量(2009年末达到1 972万人)，计算得出2009年北京市小汽车污染排放对健康的影响(考虑到2009年北京市未做居民出行调查，小汽车的污染排放量采用上述2010年的计算数据)，见表4。

采用2003年中华人民共和国卫生部卫生服务调查获得的住院和门诊费用数据^[13]，以及2003—2009年北京市居民医疗保健价格指数变动，推算出2009年北京市居民用于治疗小汽车排放导致的相关疾病的医疗费用，包括直接费用和间接费用两部分，见表5。

目前，中国共开展了四次支付意愿调查研究^[14-15]，对死亡成本进行了定量评估。由于数据不同，对应的研究和模型差别较大，得出的中国统计生命价值从25万元到170万元不等。考虑到不同研究方法、样本数量、质量等对数据的影响，本文选取几项调查结果的平均值作为北京市的统计生命价值，其值为100万元。最终，结合相关数据得到2009年北京市小汽车污染导致的健康总成本约为6.48亿元(见表6)，单车污染导致的外部健康成本约为197元(2009年末，北京市小汽车保有量约为329.1万辆)。与2009年北京市GDP 11 865.9亿元相比，小汽车污染导致的健康成本占GDP总量的0.055%；与北京市私人小汽车年均使用成本10 681元相比，小汽车污染导致的外部健康成本为使用成本的1.84%。

表4 2009年北京地区空气污染相关疾病的年发生率、回归系数及造成的健康影响

Tab.4 Annual incidences of the disease, regression coefficient and the health effects related to the air pollution in Beijing

健康终端	$f_{pi}/\%$	$\beta_i^{[10]}$	$f_{ii}/\%$	空气污染造成的案例数量	小汽车排放造成的案例数量
心脑血管疾病导致的死亡	2.798	0.02	2.743	1 092	393
呼吸系统疾病导致的死亡	0.5 772	0.06	0.544	650	234
心脑血管疾病门诊	36.1	0.005	35.919	3 577	1 288
呼吸系统疾病门诊	44.1	0.012	43.572	10 414	3 749
心脑血管疾病住院	2.69	0.07	2.512	3 503	1 261
呼吸系统疾病住院	0.86	0.12	0.767	1 833	660
慢性呼吸系统疾病	20.5	0.48	13.807	131 994	47 518

表5 2009年北京市居民就诊医疗费用

Tab.5 Medical treatment costs of residents in Beijing, 2009

元·例⁻¹

费用类别	呼吸系统疾病住院	心脑血管疾病住院	住院产生的间接费用	门诊医疗	门诊医疗间接费用	居民自我诊疗
2003年 ^[13]	5 191.52	8 769.31	514	206.73	9	76
2009年	5 362.84	9 058.70	530.96	213.55	9.3	78.51

表6 2009年北京市小汽车污染导致的健康总成本

Tab.6 Total health cost due to air pollution caused by cars in Beijing, 2009

健康终端类型	小汽车排放造成的案例数量	每例平均成本/元	总成本/元
心脑血管疾病门诊	1 288	222.85	28 7030.8
呼吸系统疾病门诊	3 749	222.85	835 464.65
心脑血管疾病住院	1 261	9 589.66	12 092 561
呼吸系统疾病住院	660	5 893.80	3 889 908
慢性呼吸系统疾病	47 518	78.51	3 730 638.2
心脑血管疾病导致的死亡	393	1 000 000	393 000 000
呼吸系统疾病导致的死亡	234	1 000 000	234 000 000
总计	55 103		647 835 603

4 结语

基于环境经济学、运输经济学的分析理论和方法,结合中国小汽车的污染排放情况,对小汽车使用导致的外部污染成本进行了理论和模型研究。根据北京市的实际情况,计算了北京市小汽车外部污染的健康成本。未来需从以下几方面做进一步研究:细化小汽车排放对农作物和生态系统等影响的相关评估模型,并根据排放量等参数进行模型应用;结合小汽车外部拥挤成本、事故成本等相关研究,根据各地区实际情况,对小汽车使用的外部污染总成本进行定量评价,计算相关外部费用,探讨合理内部化的措施和效果。

参考文献:

References:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2009 [DB/CD]. 北京: 中国统计出版社, 2009.
- [2] Maibach M, C, Schreyer D Sutter, Van Essen H P, Boon B H, Smokers R, Schrotten A, Doll C, Pawlowska B, Bak M. Handbook on Estimation of External Costs in the Transport Sector[R]. Kvk 27251086, Delft: CE Delft, 2008.
- [3] 李伟, 傅立新, 郝吉明, 等. 中国道路机动车 10 种污染物的排放量[J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(2): 36-38.
Li Wei, Fu Lixin, Hao Jiming, et al. Emission Inventory of 10 Kinds of Air Pollutants for Road Traffic Vehicles in China[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2003, 16(2): 36-38.
- [4] 陈秉衡, 洪传洁, 阚海东. 大气污染健康危险度评价的方法研究[J]. 环境与健康杂志, 2001, 18(2): 67-69.
Chen Bingheng, Hong Chuanjie, Kan haidong. Methodological Research on the Health-based Risk Assessment on Air Pollution[J]. Journal of Environment and Health, 2001, 18(2): 67-69.
- [5] 北京市交通发展研究中心战略研究部. 关于机动车总量调控与需求管理问题的调研报告[R]. 北京: 北京交通发展研究中心, 2010.
- [6] 蔡皓, 谢绍东. 中国不同排放标准机动车排放因子的确定[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, 46(3): 319-326.
Cai Hao, Xie Shaodong. Determination of Emission Factors from Motor Vehicles under Different Emission Standards in China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2010, 46(3): 319-326.
- [7] 邓杭. 北京缓堵新政实施半年汽车出行比例首次下降 [EB/OL]. 2011[2011-09-13]. <http://auto.people.com.cn/GB/15344444.html>.
- [8] 石磊, 王岐东, 付明亮. 应用居民出行状况估算北京市机动车污染排放量[J]. 北京工商大学学报(自然科学版), 2009, 27(2): 12-15.
Shi Lei, Wang Qidong, Fu Mingliang. Application of Situation of Residents Travel to Estimate Vehicles Emission in Beijing[J]. Journal of Beijing Technology and Business University(Natural Science Edition), 2009, 27(2): 12-15.
- [9] 过孝民, 赵越. 环境污染成本评估理论与方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [10] 世界卫生组织. 世界卫生组织关于颗粒物、臭氧、二氧化氮和二氧化硫的空气质量准则(2005 年全球更新版)[R]. WHO/SDE/PHE/OEH/06.02, 日内瓦: 世界卫生组织.
- [11] 北京市环境保护局. 2009 年北京市环境状况公报 [R]. 北京: 北京市环境保护局, 2010.
- [12] 陈尚和, 王沛霖. 北京市小汽车交通发展研究 [J]. 城市交通, 2008, 6(3): 53-56.
Chen Shanghe, Wang Peilin. Study on Increase of Car Ownership and Usage in Beijing[J]. Urban Transport of China, 2008, 6(3): 53-56.
- [13] 中华人民共和国卫生部. 2010 中国卫生统计年鉴 [DB/CD]. 北京: 中华人民共和国卫生部, 2010.
- [14] Hammitt J K, Zhou Y. The Economic Value of Air-Pollution-Related Health Risks in China: A Contingent Valuation Study[J]. Environment and Resource Economics, 2006, 33(3): 399-423.
- [15] Alan Krupnick. Willingness to Pay for Mortality Risk Reductions in Shanghai and Chongqing[C] // World Bank. SEPA Conference on Green China. Beijing: World Bank and SEPA, 2007.