

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2017.03.021

路网机动车排放因子测算与不确定性分析

黎 明¹, 宋国华¹, 靳秋思¹, 程 颖², 何巍楠², 翟雅峤³, 谢丽珠⁴

(1.城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室(北京交通大学),北京 100044; 2.北京市交通行业节能减排中心,北京 100053;
3.北京交通发展研究中心,北京 100053;4.华录智达科技有限公司,北京 100043)

摘 要: 为分析交通指数和排放因子的测算机理,选择以速度为衔接点,首先研究交通指数下的速度分布测算方法和速度对排放因子的修正关系;其次,研究交通指数下的路网机动车排放因子测算方法,并分析排放因子的不确定性量化方法;然后,以北京为例,测算交通指数下的路网交通排放因子.结果表明:当路网交通指数位于 2~8 之间时,CO₂排放因子随交通指数的增长而平稳增加,但交通指数在(0.6, 2]和(8, 9.4]时,CO₂排放因子随交通指数的增长而快速增加.最后,统计了不同聚类方法下的排放因子偏差率,发现按工作日节假日和上下午分类后,交通指数下的 CO₂、CO、HC、NO_x 排放因子平均偏差率分别从 3.48%、6.67%、6.08%、6.68%下降至 2.65%、5.35%、5.20%、5.36%.

关键词: 城市交通;交通环境;排放因子;交通指数;不确定性

中图分类号: U491.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2017)03-0132-06

Development of emission factor for road network and uncertainty analysis

LI Ming¹, SONG Guohua¹, JIN Qiusi¹, CHENG Ying², HE Weinan², ZHAI Yaqiao³, XIE Lizhu⁴

(1.MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology (Beijing Jiaotong University), Beijing 100044, China; 2.Beijing Transport Energy and Environmental Center, Beijing 100053, China;
3.Beijing Transportation Research Center, Beijing 100053, China; 4.Hualu Zhida Technology Co., Ltd., Beijing 100043, China)

Abstract: To analyze the influencing mechanism between traffic performance index (TPI) and emission factors, the speed distribution was taken as the connection variable. Firstly, a method for calculating speed distributions on different TPIs was established, and the relationship between the speed and emission factors was analyzed. Secondly, a method to calculate emission factors on road network was developed based on different TPIs, and a quantification method was analyzed to estimate the uncertainties. Thirdly, traffic emission factors on different TPIs were calculated for Beijing city. Results show that when the TPI is between 2 and 8, CO₂ emission factor increases monotonously with the increase of TPI. However, when TPI is between 0.6 and 2 or between 8 and 9.4, CO₂ emission factor increases rapidly. Finally, the average deviation rates of emission factors under different clustering results were calculated. It was concluded that by classifying the data from 4 aspects, workday, weekend, AM, and PM, the deviation rate of emission factors CO₂, CO, HC, NO_x decreased from 3.48%, 6.67%, 6.08%, 6.68% to 2.65%, 5.35%, 5.20%, 5.36% respectively.

Keywords: urban traffic; traffic environment; emission factors; traffic performance index; uncertainty

在环境和能源日益严峻的形势下,交通领域的节能减排成为了当今的研究热点之一.基于浮动车系统的交通指数(traffic performance index, TPI),广泛地应用在北京、深圳、杭州、广州等大城市的交通管理中.它不仅有助于出行者了解路网交通的拥堵状态,合理选择出行方式,而且有助于政府管理部门宏观把握交通运行,提出更为有效的交通需求管理措施.然而,与交通拥堵相伴而生的交通环境污染,

也逐渐成为了社会的关注热点.为量化城市道路交通中机动车的尾气排放量,国内外学者应用排放因子^[1]展开了广泛的研究.排放因子是指机动车行驶单位距离后产生的不同排放物的质量,不仅可以反映某类型车的微观排放特征,而且可以反映区域内不同交通状况下的宏观排放特征,因此,被广泛地用作机动车尾气控制对策研究的量化依据.在这样的背景下,本文试图将反映综合交通状况的交通指数,和量化城市交通机动车尾气排放的排放因子相结合,研究交通指数和排放因子二者之间的定量关系,并进行不确定性分析.以上研究成果,不仅可以拓展交通指数的应用维度,而且有利于出行者在了解交通拥堵程度的同时知悉交通排放状况,从而选择快捷而又健康的出行.

收稿日期: 2015-09-25
基金项目: 国家自然科学基金(51208033, 71273024);
中央高校基本科研业务费专项资金(T14JB00180)
作者简介: 黎 明(1989—),男,博士研究生;
宋国华(1979—),男,副教授,博士生导师
通信作者: 宋国华, ghsong@bjtu.edu.cn

1 国内外现状

交通指数是道路交通运行指数的简称,是综合反映道路网交通运行状况的指标。由于其简单易懂,便于交通出行者和管理者对实时交通拥堵情况的把握,因此,北京、广州、上海、深圳、杭州等大城市均选择交通指数作为对外发布的交通信息数据产品。在北京,交通指数^[2]通过以路网中各类功能等级道路的车辆行驶里程(vehicle kilometers of travel, VKT)为权重,在对路网各不同路段逐一按拥堵阈值分别确定拥堵等级的基础上,计算全路网或特定区域路网严重拥堵里程比例,再依据严重拥堵里程比例与拥堵指数的函数关系建立的数学模型,将交通拥堵特征数据转换为单一化的交通指数,并转化为0~10之间的一个数字。在不同的城市中,虽然交通指数的测算法理不同,但是它的应用,为实时动态路网工况分析、交通系统短板诊断、路网功能级配结构优化等提供了全新的技术手段。

在排放方面,早期的研究主要利用测试设备获得单车的排放因子,如台架测试法和道路车载测试法等。但这些方法无法获得车队或者区域的排放因子,为解决这一问题,国外的研究学者开发了排放模型,如MOVES模型^[3]、MOBILE模型^[4]、EMFAC模型^[5]、COPERT模型^[6]等。文献[7]应用MOVES模型测试了道路交通机动车的温室气体排放,并通过调整MOVES里的参数评估了MOVES中没有包涵的车型。文献[8-9]应用MOVES和MOBILE模型测算了德克萨斯州东南部机动车污染物的排放因子,结果表明MOVES和MOBILE模型均存在高估NO_x的现象。美国环境保护署^[10]应用MOBILE模型分析了轻型车、重型车以及车队的排放因子。上述模型虽然在部分城市或区域得以应用,但是均以美国或者欧洲的道路交通状况为基础进行构建的。在中国,部分学者尝试建立中国地区的排放清单,如文献[11]研究了MOBILE的模型机理,测算了中国各类型机动车HC、CO、NO_x的综合排放因子;文献[12-13]研究了MOBILE-China和PART5-China模型,并建立了澳门、广州等地的排放清单;文献[14]提出适用于中国城市交通规划的MOBILE模式法参数修正及参数计算方法等,但由于国内学者所建立的排放模型缺乏一致性,还未被广泛认可。在区域排放因子的研究中,文献[15-16]对单车的排放特性和影响因素进行了研究,为利用排放模型测算区域交通排放因子奠定了基础。文献[17]利用IVE模型测算了杭州市轻型车和出租车的CO和NO_x综合排放因子;文献[14,18]利用MOBILE模型分别计算了

北京市和南京市部分车型的排放因子。而对于排放因子构建过程中行驶工况的建立方法,文献[19]针对传统行驶工况建立方法存在的数据收集困难、缺乏有效评价指标等问题,提出了基于浮动车逐秒数据的分道路类型和速度的方法,和利用机动车功率分布划分短行程的方法。经过实地验证,结论指出文章建立的方法能够反映不同交通状态下油耗和排放测算的机动车行为特征。

从以上研究可以看到,现有的排放因子研究多是通过测试研究单车排放,或者通过修正国外排放模型的参数获取本地区的排放因子,这有可能是因为受限于当时的交通数据采集设备或技术,无法采集大量的数据样本。此外,现有的研究中还缺乏对交通指数和排放因子的关系的探讨。随着交通指数的广泛应用,大量的区域交通运行数据得以收集,为研究本地区域交通排放奠定了数据基础,基于此,本文将探索交通指数和排放因子之间的关系。

2 基于交通指数的排放因子

为测算交通指数下的路网机动车排放因子,本文分别对交通指数和排放因子的测算方法进行了分析,发现交通指数的研究依赖于对路段速度的把握;排放因子与平均速度也存在着一定的量化关系。因此,本文将通过以速度为中间点,研究交通指数和排放因子的关系。其中,交通指数与速度的关系以不同交通指数下的速度分布量化;排放因子与速度的关系以速度对排放因子的修正量化。

2.1 交通指数下的速度分布

为计算交通指数下路网运行的速度分布,本文通过测算同一指数下不同速度区间的路段VKT之和占路网VKT总量的比例来获得。车辆行驶里程是衡量机动车行驶量多少的基本单位,表示的是特定路网中所有车辆的行驶里程总和。由于在现有的技术条件下,不可能得到每辆车实际跑行里程的精确值,因此,研究中常用交通量和路段长度的乘积来估算VKT。与此同时,考虑到不同道路类型上车辆的运行特性有显著差异,如快速路上由于有物理隔离设施,车流的干扰因素较少,车流运行流畅;主干路上由于设有红绿灯,车流会被经常打断;次支路上常有有机非混行现象等,因此,需要分道路类型研究交通指数下的速度分布,具体为

$$S_{N,K,V} = \sum_l Q_l \cdot L_l, \quad (1)$$

$$P_{N,K,V} = \frac{S_{N,K,V}}{\sum_v S_{N,K,V}}. \quad (2)$$

式中: S 为VKT,km; N 为第 N 种道路类型; K 为交通

指数; V 为速度区间, km/h; l 为第 N 种道路类型上平均速度位于 V 的路段编号; Q 为路段 l 上的流量, veh; L 为路段 l 的长度, km.

2.2 速度对排放因子的修正

美国环保部发布的 MOVES 2014 技术报告指出,排放因子的影响因素包括有车辆年均行驶里程、车辆运行时间分布、平均速度、道路类型等,因此,为真实反映车辆排放因子的变化规律,现有的研究多采用车载排放测试法采集基础数据,再结合地理信息系统(geography information system, GIS)等软件对车辆轨迹分类,如此控制多种因素,分析单一因素下的排放因子变化规律. 考虑到本文的研究目的与数据获取的复杂度,本文将从两个因素研究速度对排放因子的修正关系:道路类型和平均速度.

为研究速度对排放因子的修正,近年来,以 MOVES 为代表的排放模型采用了基于机动车比功率(vehicle specific power, VSP)的变量聚类分析的方法^[20],刻画 VSP 与排放因子的关系. VSP 的概念是由麻省理工学院的 Jimenez-Palacios 于 1999 年提出,其定义为机动车牵引单位质量需要的瞬时功率,是发动机为克服滚动摩擦阻力和空气阻力,增加机动车动能和势能所需要输出的功率,单位是 kW/t^[16]. 在后来的研究中,美国环保部在轻型车沿用了 VSP 的概念,而对于重型车,其提出了意义相近的 STP(scaled-tractive power, STP)来代替 VSP. 关于轻型车 VSP^[3]和重型车 STP^[21]计算公式分别为

$$S_1 = \frac{A \cdot v + B \cdot v^2 + C \cdot v^3 + m \cdot v \cdot a}{m}, \quad (3)$$

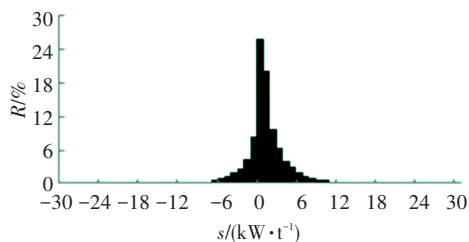
$$S_2 = \frac{A \cdot v + B \cdot v^2 + C \cdot v^3 + m \cdot v \cdot a}{f}. \quad (4)$$

式中: S_1 为 VSP, kW/t; S_2 为 STP, kW/t; v 速度, m/s; a 为车辆加速度, m/s²; m 为车辆质量, t; A 、 B 和 C 分别为车辆的滚动摩擦阻力、坡度阻力和空气阻力系数; f 为车辆总质量, t. 基于 VSP(以下统一用 VSP 表示 VSP 和 STP)的排放因子求解方法能准确地阐述车辆运行与排放的关系,成为当前研究的主流方法,因此,本文以 VSP 为中间变量,分道路类型分析速度对排放因子的修正关系.

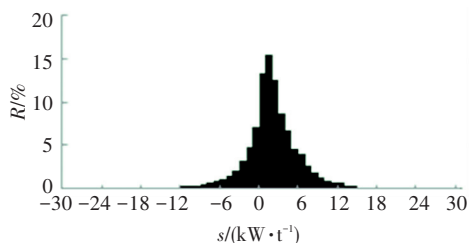
一般地,利用 PEMS、GPS 等设备在排放测试中获取的数据可分为两类,排放数据和工况数据. 排放数据是指收集到的车辆在运行过程中不同排放物的逐秒排放量,即排放率数据;工况数据是指含有经纬度的车辆逐秒运行轨迹,可以利用 GIS 软件将其按道路类型分类. 为研究速度对排放因子修正关系,首先,不同道路类型上的工况数据将划分短行程. 所谓短行程,是指机动车能完整反映车辆运行

特性的一段连续的速度序列. 考虑到不同道路类型上,机动车完成一个短行程所需的平均时间不同,因此,本文建议快速路的时间间隔为 60 s,非快速路的时间间隔为 300 s. 然后,通过计算短行程平均速度,按平均速度合并短行程,形成分速度的短行程集合;最后,分析短行程集合的 VSP 分布,为测算排放因子奠定基础.

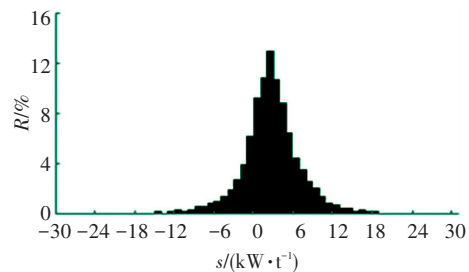
所谓 VSP 分布,是指在短行程集合内,机动车在各个 VSP 区间(VSP bin)的行驶时间占总行驶时间的比例,如图 1 所示. 相比行驶周期等其他参数, VSP 分布不仅能够更好的刻画和描述实际道路上机动车的行为特性,而且具有一定的统计意义,即同样的车型在同等级道路上行驶,如果平均速度相同,则 VSP 分布总是一定的. VSP 分布的计算公式为



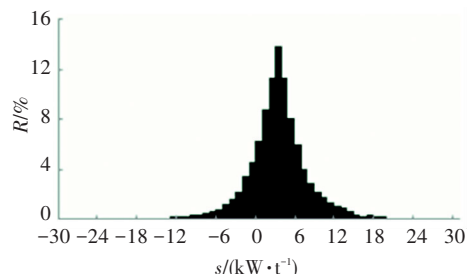
(1) 20~22 km/h



(2) 30~32 km/h



(3) 40~42 km/h



(4) 50~52 km/h

图 1 快速路上轻型车在不同速度下的 VSP 分布^[22]

Fig.1 VSP distribution of light duty car at different speed on expressway^[22]

$$R_{i,j} = \frac{N_{i,j}}{N_j},$$

$$\forall S \in [n - 0.5, n + 0.5], S_b = n. \quad (5)$$

式中: S 为 VSP, kW/t; S_b 为 VSP 区间; $R_{i,j}$ 为第 j 个行程速度区间的第 i 个 VSP bin 的分布率; N_j 为第 j 个行程速度区间下的 VSP 总数; $N_{i,j}$ 为第 j 个行程速度区间的第 i 个 VSP bin 中 VSP 的个数; n 为整数。

与 VSP 分布相结合得到排放因子的是 VSP bin 的平均排放率。已有文献的研究结果表明,车辆的属性相同(车质量、车龄、排放标准等),则当 VSP 值相等时,排放率相近,因此,通过对大量的排放数据按车型分类,计算 VSP,然后按 VSP bin 分类,计算各 VSP Bin 下的平均排放率。结合上文中不同速度下的 VSP 分布,则不同速度下的排放因子测算公式为

$$F_{N,L,V} = \frac{\sum R_{N,i,j} \times R_{L,i}}{V_j} \times 3\,600. \quad (6)$$

式中: $F_{N,L,V}$ 为第 N 种道路类型上车型 L 在平均速度 V 时的排放因子, g/km; V_j 为第 j 个行程速度区间的平均速度, km/h; $R_{N,i,j}$ 为第 N 种道路类型第 j 个行程速度区间的第 i 个 VSP bin 的分布率; $R_{L,i}$ 为车型 L 在第 i 个 VSP bin 的平均排放率, g/s。

2.3 交通指数与排放因子的关系

2.3.1 基于交通指数的排放因子测算

为了研究基于交通指数的排放因子,本文选择了基于 VSP 分布的方法测算速度与排放因子的关系。然而,考虑到交通指数下的速度分布是对路网上各种车型的统计分析,因此,有必要结合道路实际运行的车型比例,综合反映道路上速度对排放因子的修正关系,公式为

$$F_{N,V} = \sum_V X_{N,L} \times F_{N,L,V}. \quad (7)$$

式中 $F_{N,V}$ 为第 N 种道路类型上在速度 V 时的排放因子, g/km; $X_{N,L}$ 为第 N 种道路类型上车型 L 的权重。

根据式(2)、(7),基于交通指数的路网排放因子测算模型为

$$F_{N,K} = \sum_V F_{N,V} \times P_{N,K,V}, \quad (8)$$

$$F_K = \sum_N \varphi_N \times F_{N,K}. \quad (9)$$

式中: $F_{N,K}$ 为在第 N 种道路类型上交通指数 K 时的排放因子, g/km; F_K 为路网上交通指数 K 时的排放因子, g/km; φ_N 为第 N 种道路类型的 VKT 权重。

2.3.2 基于交通指数的排放因子不确定性分析

一般的,交通指数是从路段到路网不断积聚而形成的综合性评价指标,因此,用交通指数下的速度分布来反映复杂多变的路网交通拥堵状况,具有一定的不确定性,而这将导致交通指数和排放因子之间的关系存在着不确定性。从交通指数产生机理分

析,以北京为例,交通指数源于3种等级道路严重拥堵里程比例加权求和并转化而来,并没有考虑非严重拥堵里程的因素;且在权重一定的情况下,存在着3种等级道路严重拥堵里程比例组合不同,但得到的交通指数相同的现象。除此之外,不同道路上拥堵阈值不同、交通流的时变特征等,也是导致速度分布不确定性的原因。

为此,在95%的置信度下,本文将统计不同交通指数下的排放因子偏差大小,即在平均值上下的浮动值来量化二者之间的不确定关系。基于置信区间和标准差的计算公式,偏差和偏差率的计算公式分别为

$$\delta = 1.96 \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2}{n}}, \quad (10)$$

$$\phi = \frac{\delta}{\bar{s}} \times 100\%. \quad (11)$$

式中: δ 为偏差量, g/km; ϕ 为偏差率; n 为样本量; s_i 为第 i 个样本值; $\bar{s}$ 为均值。

为减小交通指数下排放因子的不确定性,减小交通指数下速度分布的不确定性是关键。根据前文的分析,将路网交通特性类似的数据聚类,增加交通指数的分类维度,可减小不确定性。考虑到居民在工作日和周末的出行习惯、上下午的交通流特征、交通需求管理政策等^[23-24],本文建议将交通指数数据聚类分析,分工作日和周末、上午和下午等。

3 案例应用及不确定性分析

本文以北京城市道路交通为例,研究北京交通指数和机动车排放因子的关系,并以此为基础,分析交通指数下的排放因子不确定性。考虑到数据收集的困难,本文假设机动车均为国四轻型汽油车,且行驶里程为8~12万公里。北京交通大学交通环境实验室利用PEMS设备共收集130万余条排放数据^[25],涵盖了轻型汽油车在快速路、主干路和次支路上不同速度区间下的行驶特性,为本文的研究奠定了数据基础。结合式(3)、(5)、(6),以CO₂排放因子为例,其随速度的变化规律见图2。

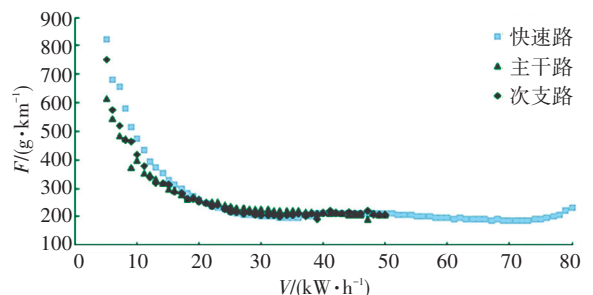


图2 排放因子随速度的变化关系

Fig.2 Relationship between emission factors and velocity

从图 2 可以看到,当速度小于 30 km/h 时,排放因子随着速度的增加而显著降低;当速度超过 30 km/h 时,排放因子趋于稳定,有较小的波动;当速度超过 80 km/h 时,排放因子开始上升. 而排放因子最小处位于 60~80 km/h 区间,这也和车辆的经济速度相吻合.

基于此,路网交通指数与 CO₂ 排放因子的关系如图 3 所示. 从图 3 可以看出,随着交通指数的增加,排放因子也随之增长,当路网交通指数在 2~8 之间时,排放因子增长平稳,但是交通指数为 (0.6, 2] 和 (8, 9.4] 时,排放因子增长迅速. 此外,本文通过拟合,得到 CO₂ 排放因子与路网交通指数的函数关系式,且可靠性指标 R^2 超过 0.97,说明拟合效果较好,可靠性较高. 同理,可以获得路网交通指数与 CO、HC、NO_x 排放因子的关系图,本文不再赘述.

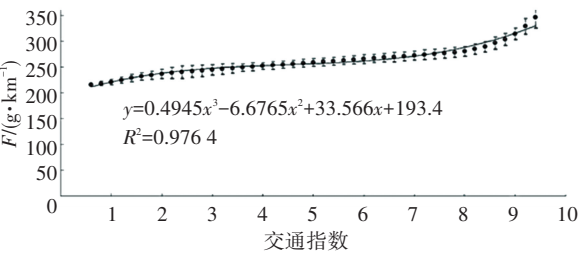
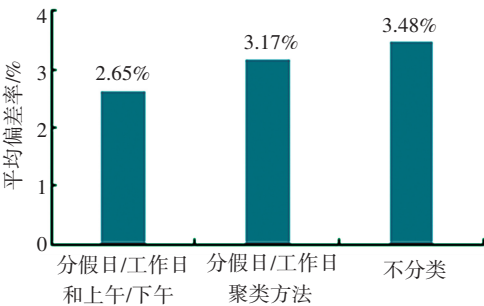


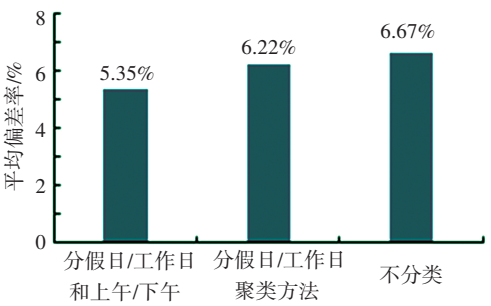
图 3 排放因子随速度的变化关系

Fig.3 Relationship between emission factors and velocity

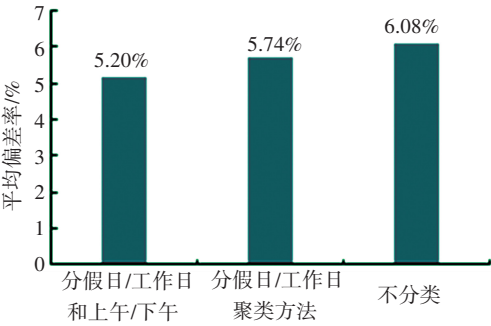
为验证减小不确定性的分类方法,本文对不同分类方法下的路网交通指数与排放因子的偏差率进行了统计,结果如图 4 所示. 可以看到,通过聚类分析,交通指数下的排放因子偏差率均有所下降,如 CO₂ 排放因子在不分类的情况下,平均偏差率为 3.48%,但是,经过初步划分为工作日和节假日,偏差率降低为 3.17%. 如果进一步划分上下午,则偏差率进一步缩小为 2.65%. 同时,CO、HC、NO_x 的排放因子平均偏差率也分别从 6.67%、6.08%、6.68%下降至 5.35%、5.20%、5.36%. 因此,将交通指数数据按交通规律分布进行分类分析,能有效地降低交通指数下的排放因子偏差率.



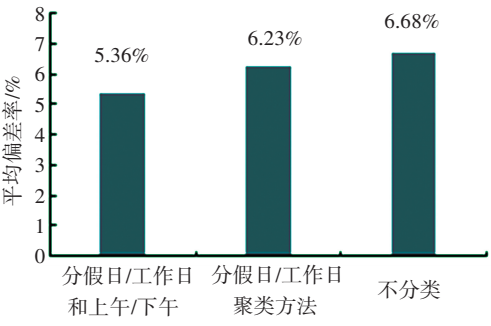
(a) CO₂



(b) CO



(c) HC



(d) NO_x

图 4 路网排放因子随交通指数的分布规律

Fig.4 Relationship between emission factors and TPIs on road network

4 结 论

- 1) 通过分析交通指数和排放因子的测算方法,选择以速度为衔接点,研究了交通指数下的速度分布测算方法,以及速度对排放因子的修正关系.
- 2) 随着交通指数的增加,CO₂ 排放因子也随之增长,当路网交通指数在 2~8 之间时,CO₂ 排放因子增长平稳,但是交通指数为 (0.6, 2] 和 (8, 9.4] 时,CO₂ 排放因子增长迅速.
- 3) 交通指数数据按工作日节假日和上午下午分类后,交通指数下的 CO₂、CO、HC、NO_x 排放因子平均偏差率分别从 3.48%、6.67%、6.08%、6.68%下降至 2.65%、5.35%、5.20%、5.36%.
- 4) 在今后的研究中,将继续深入探索降低不确定性的聚类方法,包括考虑实际路网车型分布和基于旅行时间或延时类的交通指数算法等.

参考文献

[1] KRISTENSSON A, JOHANSSON C, WESTERHOLM R, et al. Real-world traffic emission factors of gases and particles measured in a road tunnel in Stockholm, Sweden[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38: 657-673.

[2] 全永棠, 郭继孚, 温慧敏, 等. 城市道路网运行实时动态评价理论和技术研究[J]. 中国工程科学, 2011, 13(1): 43-48.

QUAN Yongshen, GUO Jifu, WEN Huimin, et al. Theory and technology of real-time dynamic evaluation of urban road network[J]. Engineering Science, 2011, 13(1): 43-48.

[3] U.S. Environmental Protection Agency. Development of emission rates for light-duty vehicles in the motor vehicle emissions simulator (MOVES2010), final report, EPA-420-R-11-011[R]. Washington DC: EPA, 2011.

[4] U.S. Environmental Protection Agency. User's guide to MOBILE6.1 and MOBILE6.2, EPA420-R-03-010[R]. Washington DC: EPA, 2003.

[5] Air Resources Board. EMFAC2011-LDV User's guide[R]. Sacramento: EPA, 2013.

[6] European Environment Agency. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013, TH-AK-13-012-EN-N[R]. Luxembourg: European Environment Agency, 2013.

[7] KALL D, JACKSON D, PERLMAN J. Using MOVES to conduct a greenhouse gas inventory for on-road mobile sources in the northern New Jersey region[C]// 92nd Transportation Research Board Annual Meeting. Washington DC: Transportation Research Board of the National Academies, 2013.

[8] KOTA S, YING Q, ZHANG H, et al. Evaluation of CO and NO_x emissions from MOVES and MOBILE6.2 in southeast Texas using a source-oriented CMAQ model[C]//92nd Transportation Research Board Annual Meeting. Washington DC: Transportation Research Board of the National Academies, 2013.

[9] KOTA S, YING Q, SCHADE G. MOVES vs MOBILE6.2: differences in emission factors and regional air quality predictions[C]// 91st Transportation Research Board Annual Meeting. Washington DC: Transportation Research Board of the National Academies, 2012.

[10] POLLACK A, LINDHJEM J, STOECKENIUS T, et al. Evaluation of the U.S. EPA Mobile6 highway vehicle emission factor model[R]. Novato: ENVIRON International Corporation, 2004.

[11] 林秀丽. 中国机动车污染物排放因子及其修正方法研究[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(9): 38-43.

LIN Xiuli. Vehicle emissions factor and its correction method of China[J]. Environmental Science and Management, 2009, 34(9): 38-43.

[12] 吴烨, 郝吉明, 傅立新, 等. 澳门机动车排放清单[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 12: 1601-1604.

WU Ye, HAO Jiming, FU Lixin, et al. Emissions inventory for mobile sources in Macao, China[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2002, 12: 1601-1604.

[13] 姚欣灿, 黄如娜, 农加进, 等. 广州市 2010 年道路机动车排放清单研究[J]. 广州环境科学, 2012, 27(2): 20-24.

YAO Xinchuan, HUANG Runa, NONG Jiajin, et al. Vehicle emission inventory of Guangzhou in 2010[J]. Guangzhou Environmental Sciences, 2012, 27(2): 20-24.

[14] 李修刚, 杨晓光, 王伟, 等. 用于城市交通规划的机动车污染物排放因子[J]. 交通运输工程学报, 2001, 1(4): 87-91.

LI Xiugang, YANG Xiaoguang, WANG Wei, et al. Motor vehicles' exhaust emission factors for urban transportation planning[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2001, 1(4): 87-91.

[15] 高继东, 秦孔建, 梁荣亮, 等. 北京道路工况下公交车 PM 和 NO_x 排放特性试验研究[J]. 汽车工程, 2011, 33(9): 757-760.

GAO Jidong, QIN Kongjian, LIANG Rongliang, et al. An experimental study on the PM and NO_x emission characteristics of public bus in real driving condition in Beijing[J]. Automotive Engineering, 2011, 33(9): 757-760.

[16] 李孟良, 冯玉桥, 秦孔建, 等. 北京市轻型在用车实际道路排放特征分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2011, 35(2): 237-240.

LI Mengliang, FENG Yuqiao, QIN Kongjian, et al. Real-world emission characteristics of in-use light-duty vehicles in Beijing[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2011, 35(2): 237-240.

[17] 董红召, 徐勇斌, 陈宁. 基于 IVE 模型的杭州市机动车实际行驶工况下排放因子的研究[J]. 汽车工程, 2011, 33(12): 1034-1038.

DONG Hongzhao, XU Yongbin, CHEN Ning. A research on the vehicle emission factors of real world driving cycle in Hangzhou city based on IVE model[J]. Automotive Engineering, 2011, 33(12): 1034-1038.

[18] 毕晔, 葛蕴珊, 韩秀坤. 基于 MOBILE 6.2 的北京市出租车排放污染物分析[J]. 安全与环境学报, 2007, 7(2): 61-64.

BI Ye, GE Yunshan, HAN Xiukun. Analysis of emission pollutants from Beijing taxi based on MOBILE 6.2[J]. Journal of Safety and Environment, 2007, 7(2): 61-64.

[19] SONG G, YU L, WU Y. Development of speed correction factors based on speed-specific VSP distributions for urban restricted access roadways in Beijing[C]// 93rd Transportation Research Board Annual Meeting. Washington DC: Transportation Research Board of the National Academies, 2014.

[20] 宋国华. 分道路类型的不同速度行驶工况开发方法[J]. 交通标准化, 2010(23): 38-41.

SONG Guohua. Approach of developing driving operating mode classified by road types and driving speed[J]. Communications Standardization, 2010(23): 38-41.

[21] U.S. Environmental Protection Agency. Development of emission rates for heavy-duty vehicles in the motor vehicle emissions simulator (MOVES2010), Final Report, EPA-420-R-12-049[R]. Washington DC: EPA, 2012.

[22] 黎明, 宋国华, 于雷, 等. 基于 VISSIM 的道路交通排放评价可行性分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(5): 56-63.

LI Ming, SONG Guohua, YU Lei, et al. Feasibility analysis of emission evaluation for road traffic based on VISSIM[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2013, 13(5): 56-63.

[23] WEN H, SUN J, ZHANG X. Study on traffic congestion patterns of large city in china taking Beijing as an example[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2014, 138: 482-491.

[24] 王云鹏, 郭栋, 隗海林, 等. 城市分等级道路车辆运行速度对排放的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(7): 110-114.

WANG Yupeng, GUO Dong, KUI Hailin, et al. Impact of driving speed on vehicle emission on four different graded roads[J]. Journal of Harbin Institution of Technology, 2009, 41(7): 110-114.

[25] SONG G, YU L. Estimation of fuel efficiency of road traffic by a characterization of VSP and speed based on FCD[J]. Transportation Research Record, 2009, 5005: 11-20.

(编辑 魏希柱)