

# 基于正交试验的信号交叉口机动车排放影响因素分析

姚荣涵, 龙 梦, 赵胜川

(大连理工大学交通运输学院, 大连 116024)

**摘 要:** 为考虑温湿度、坡度、中型车比例、公交车比例、交通需求 5 种因素对小汽车、中型车、公交车的  $\text{NO}_x$ 、CO、HC 排放的影响,设计正交试验方案,利用 VISSIM 软件获得每种试验方案对应的交通流量、速度等数据,结合 MOVES 模型得到每一路段不同车型不同污染物的排放量和排放因子. 采用方差分析和极差分析处理正交试验结果,对坡度与排放因子进行回归分析,还比较了进口道与非进口道上、不同排放阶段下所得排放因子的差异. 结果显示,温湿度、坡度、中型车比例、公交车比例、交通需求对机动车排放量有显著影响;当交通流处于非拥挤状态时,随着下坡坡度的减小或上坡坡度的增加,各车型各污染物的排放因子均增加;机动车排放因子及其随坡度的变化率在进口道上均为在非进口道上的 1.5 ~ 6.5 倍;国四、国五、国六阶段的机动车排放因子相比国三阶段分别降低约 27.5%、38.8%、54.9%. 研究成果表明,温湿度、坡度、交通流组成、交通需求、是否处于进口道以及排放阶段都对各类机动车各种污染物的排放有重要影响.

**关键词:** 城市交通; 因素分析; 正交试验; 机动车排放; 排放因子; 排放阶段

**中图分类号:** U 491.9+2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0254-0037(2020)03-0300-11

**doi:** 10.11936/bjtxb2018100012

## Influencing Factor Analysis of Vehicle Emissions at a Signalized Intersection Based on Orthogonal Experiments

YAO Ronghan, LONG Meng, ZHAO Shengchuan

(School of Transportation and Logistics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Considering the impacts of temperature and humidity, grade, medium-size vehicle ratio, bus ratio, and traffic demand on  $\text{NO}_x$ , CO and HC emissions of car, medium-size vehicle and bus, the orthogonal experiment scenarios were designed. Using the VISSIM software, the data of traffic volume, speed and the others were first obtained for each scenario. Then, the emission quantities and factors per link were estimated for different vehicle types and for different pollutants by combining the VISSIM software with the MOVES model. The analysis of variance and range analysis were carried out to process the outcomes from the orthogonal experiments, and the regression analysis was done to acquire the relationship between emission factor and grade. The emission factors at approaches and at non-approaches, and the emission factors obtained under various stages were also compared separately. The outcomes reveal that temperature and humidity, grade, medium-size vehicle ratio, bus ratio, and traffic demand all have significant impacts on vehicle emission quantities; the emission factor of each pollutant increases for each type of vehicle in non-congestion when the downhill grade declines or the uphill grade raises; the emission factors and their change rates with grade at approaches are 1.5 – 6.5 times higher than those at non-approaches; compared with stage three, the emission factors under stages four, five and

收稿日期: 2018-10-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578111)

作者简介: 姚荣涵(1979—),女,副教授,主要从事间断交通流理论方面的研究, E-mail: cyanyrh@dlut.edu.cn

six decrease by 27.5%, 38.8% and 54.9%, respectively. Results show that temperature and humidity, grade, vehicle composition, traffic demand, whether vehicles are at approaches, and emission stage all have important effects on traffic emissions for different vehicle types and for different pollutants.

**Key words:** urban traffic; factor analysis; orthogonal experiment; vehicle emissions; emission factor; emission stage

随着城市机动化的高速发展,机动车保有量逐年增加,机动车对环境带来的不利影响越发突显,如噪声污染、土地资源过度开发等,其中最受关注的还是尾气排放。近年来,大气污染中超过90%的氮氧化物 $\text{NO}_x$ 以及超过80%的碳氢化合物 HC 和一氧化碳 CO 都来自于机动车排放<sup>[1]</sup>,因此交通环境相关部门一直致力于寻找降低机动车排放的有效方法。为此,机动车排放的影响因素分析显得尤为重要。

目前,国内外众多学者探讨了机动车排放估算方法及其影响因素。一方面,常用的机动车排放估算方法有4种:一是利用便携式排放测试系统 PEMS 直接地、精确地采集试验车辆排放数据<sup>[2-6]</sup>,但需要购置设备,且通常测试车辆的数量非常有限;二是依据测试车辆所得机动车比功率分区数据估算区域机动车排放,这是广泛应用的一种方法<sup>[7-10]</sup>;除此之外,还有美国环保局资助开发的 IVE 模型和自主研发的 MOVES 模型,这些模型只需经过本土化处理就能用于测算其他城市的排放,且计算结果较为准确<sup>[5,6,11-14]</sup>。另一方面,许多学者采用上述方法研究了速度、加速度、坡度、温度、燃油、荷载、交叉口控制方式等对机动车排放的影响。结果发现,这些因素都对机动车排放有显著影响,且其影响规律受限于具体的研究对象和范围。例如,随着速度、加速度、坡度的增加,轻型车、中重型车、公交车的 $\text{NO}_x$ 、CO、HC 排放因子增大<sup>[2,9,12-13]</sup>;随着荷载增加,重型车、公交车的 $\text{NO}_x$ 、CO、HC 排放因子增加<sup>[3,9]</sup>;燃油类型及其各项参数都会对机动车 $\text{NO}_x$ 、CO、 $\text{CO}_2$ 、HC 排放因子产生一定影响<sup>[5,12-13]</sup>;随着流量、卡车比例、坡度的增加,路网中 $\text{CO}_2$ 排放量增加,驾驶风格和交叉口控制方式也会影响路网中 $\text{CO}_2$ 排放量<sup>[8,14]</sup>。

上述研究说明不仅机动车排放估算方法相对成熟而且一些机动车排放影响因素已被探讨。然而,温湿度和交通流组成对城市道路机动车排放的影响较少得到关注,并且鲜有从微观角度同时分析多种机动车排放影响因素。鉴于此,结合微观交通仿真软件 VISSIM 和新一代综合移动源排放模型

MOVES,本研究采用正交试验方法同时考虑温湿度、坡度、中型车比例、公交车比例、交通需求5种因素对小汽车、中型车、公交车的 $\text{NO}_x$ 、CO、HC 排放的影响,并进一步分析进口道处与非进口道处以及不同排放阶段排放因子的差异。

## 1 试验设计

### 1.1 研究思路

本研究的思路如图1所示,选择一个典型的四路交叉口作为研究对象,考虑温湿度、坡度、中型车比例、公交车比例、交通需求5种因素,每种因素选定4个水平,并设计正交试验方案。

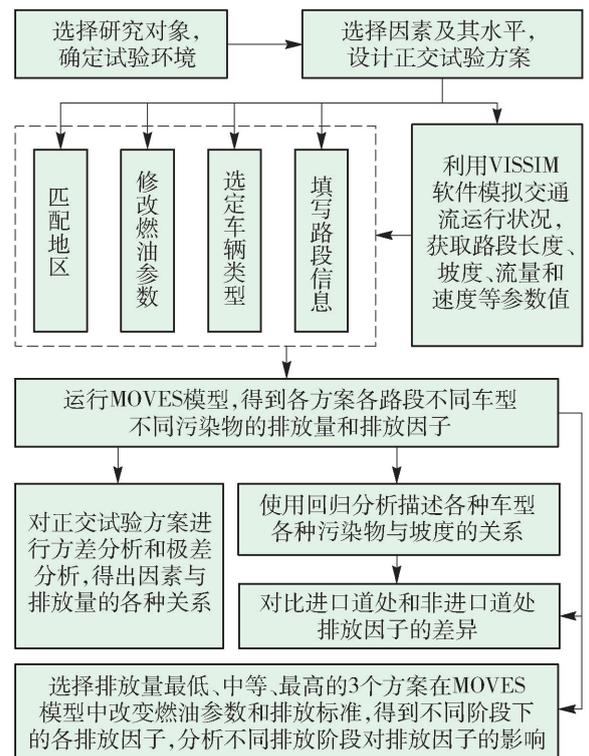


图1 研究思路

Fig. 1 Research framework

针对每种试验方案,利用 VISSIM 软件模拟交通流运行状况,获得流量、速度等数据,再根据相关参数建立 MOVES 模型。在 MOVES 建模过程中,根据气候状况和地理位置匹配试验地区,参照国家汽油及柴油标准修改燃油参数,选定试验车辆类型,并

输入 VISSIM 所得路段长度、坡度、流量、速度等. 然后运行各 MOVES 模型, 得到各方案各路段不同车型不同污染物的排放量和排放因子, 之后通过方差分析和极差分析得出单个因素对  $\text{NO}_x$ 、CO、HC 排放量的影响, 并考虑各方案的排放结果, 使用线性回归确定各车型各污染物排放因子与坡度的关系曲线. 除上述因素外另单独对进口道处与非进口道处的机动车排放因子进行比较, 且选择试验方案中排放量最低、中等、最高的方案改变其排放阶段, 分析执行国三、国四、国五、国六排放阶段所得排放因子的变化规律.

## 1.2 试验环境

研究对象如图 2(a) 所示, 交叉口东进口、西进口、南进口、北进口均渠化 1 条直右车道、1 条直行车道、2 条左转车道(最内侧为短车道). 进口道渠化段均为 50 m, 非短车道的进口道渠化段后方路段均为 150 m, 交叉口内部左转、直行、右转所在路段分别约为 55、65、36 m, 出口道路段均为 200 m. 西进口、北进口、东进口、南进口左转车流分别编号为 M1、M3、M5、M7, 东进口、南进口、西进口、北进口直行车流分别编号为 M2、M4、M6、M8. 交叉口相位方案见图 2(b), 信号周期时长为 70 s, 黄灯时间为 3 s, 全红时间为 2 s, 相位 1、相位 2、相位 3、相位 4 绿灯时间分别为 12、13、12、13 s.

在 MOVES 建模中, 选择大连市为研究地区.

## 1.3 正交试验设计

考虑温度、湿度、坡度、各车型比例、交通需求对机动车排放的影响, 进行正交试验设计, 表 1 给出了选定的因素及其水平. 由于温度和湿度之间存在一定关系, 将温度和湿度组合为一个因素, 选取大连 1 月、4 月、8 月、10 月的平均温度和湿度分别代表其冬、春、夏、秋四季的气象状况<sup>[15]</sup>. 假设所选交叉口南北向道路水平, 东西向道路坡度设置 4 种水平.

表 1 因素与水平

Table 1 Factors and levels

因素	水平			
	1	2	3	4
温湿度	(-1.72 °C, 59%)	(11.89 °C, 53%)	(25.22 °C, 76%)	(14.50 °C, 61%)
坡度/%	1	3	5	7
中型车比例/%	0	5	10	15
公交车比例/%	0	5	10	15
交通需求/(辆·h <sup>-1</sup> )	2 400	3 200	4 000	4 800

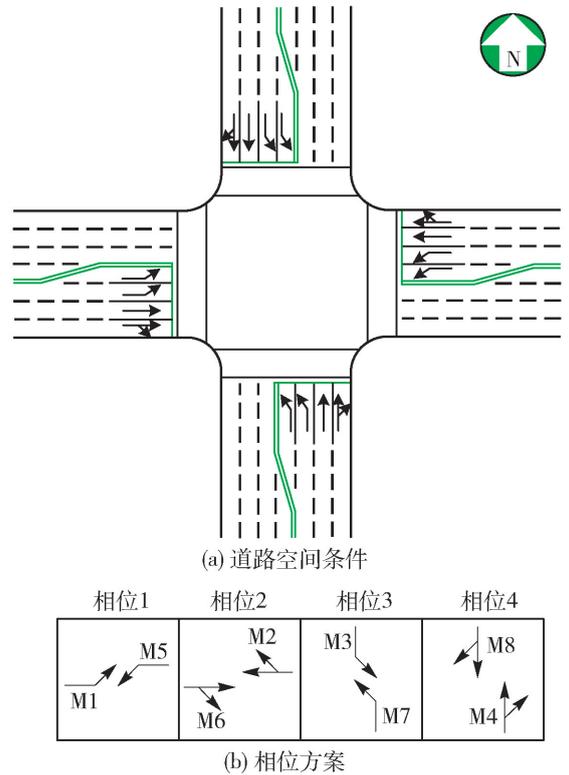


图 2 研究对象

Fig. 2 Studied intersection

结合大连市实际情况, 考虑小汽车 Car、中型车 MSV、公交车 Bus, 为中型车和公交车比例设置 4 种水平. 选取 2 400、3 200、4 000、4 800 辆/h 作为整个交叉口的交通需求水平, 可表征自由流、稳定流、不稳定流、交通阻塞流 4 种交叉口交通流运行状况. 结合大连实际情况选取以上 5 种因素的各水平值, 这些值满足城市道路设计规范, 尽可能考虑所有情形, 可代表全国北部地区各中小城市的干道交叉口. 假定各进口的交通需求相同, 且右转、直行、左转的比例为 1:9:6. 对于上述均有 4 种水平的 5 种因素, 采用  $L_{16}4^5$  正交表, 其正交试验方案如表 2 所示.

表2 正交试验方案  
Table 2 Orthogonal experimental scenarios

试验号	因素				
	温湿度	坡度/%	中型车比例/%	公交车比例/%	交通需求/(辆·h <sup>-1</sup> )
1	(-1.72 ℃, 59%)	3	10	5	4 000
2	(25.22 ℃, 76%)	7	0	5	3 200
3	(11.89 ℃, 53%)	7	10	10	4 800
4	(14.50 ℃, 61%)	3	0	10	2 400
5	(-1.72 ℃, 59%)	5	0	15	4 800
6	(25.22 ℃, 76%)	1	10	15	2 400
7	(1.89 ℃, 53%)	1	0	0	4 000
8	(14.50 ℃, 61%)	5	10	0	3 200
9	(-1.72 ℃, 59%)	1	15	10	3 200
10	(25.22 ℃, 76%)	5	5	10	4 000
11	(11.89 ℃, 53%)	5	15	5	2 400
12	(14.50 ℃, 61%)	1	5	5	4 800
13	(-1.72 ℃, 59%)	7	5	0	2 400
14	(25.22 ℃, 76%)	3	15	0	4 800
15	(11.89 ℃, 53%)	3	5	15	3 200
16	(14.50 ℃, 61%)	7	15	15	4 000

## 2 排放模型构建与数据获取

由于 MOVES 模型是基于美国的交通环境开发的,在运用到其他城市时需对众多参数进行标定<sup>[12]</sup>.

### 2.1 地区选择

本试验选择大连市,需依据地理信息在 MOVES 模型中选择与之匹配的城市.通过对比经度、纬度、海拔、气温和降水量等指标,发现中国大连市和美国特拉华州肯特县纬度相近、气候相似、濒临海洋,大连市和特拉华州肯特县的地理位置和气象数据如表3所示.

### 2.2 燃油标准

汽油的燃油性质涉及馏程、蒸气压、硫质量分数、苯体积分、芳烃体积分、烯体积分等参数,柴油的燃油性质只涉及硫质量分数<sup>[12]</sup>.因为上述大连市气象数据来源于《大连市统计年鉴2016》,所以这里选择2015年为 MOVES 模型的模拟年.2015年大连市执行国四汽油和国四柴油标准,根据此标准调整燃油参数,具体参数值如表4所示.雷

氏蒸气压 RVP 为衡量液体燃料好坏的指标,国标中11月1日至4月30日的 RVP 为42~85 kPa,5月1日至10月31日的 RVP 为40~68 kPa,该参数值选择68 kPa,由于 MOVES 模型采用 Psi (Pounds per square inch) 单位,所以将其除以6.895 kPa/Psi 进行换算. E200 和 E300 可以通过50%蒸发温度 T50 和90%蒸发温度 T90 计算得到,其表达式为<sup>[12]</sup>

$$E200 = 147.91 - T50/2.04082$$

$$E300 = 155.47 - T90/4.54545 \quad (1)$$

### 2.3 车辆类型

本研究考虑小汽车、中型车、公交车3种车型,经过对比,MOVES 模型中选择小型客车、中型商务车、公共汽车,其编号分别为21、32、42,其燃油分别选择汽油、汽油、柴油.

### 2.4 路段信息

在 MOVES 建模过程中,需输入长度、坡度、流量、速度等路段信息.本研究利用 VISSIM 软件提供这些信息.对于上述正交试验方案1~16,由西向东道路坡度为正、由东向西道路坡度为负.对于每个试验方案,利用 VISSIM 软件仿真5次,数据采集时

表3 大连与特拉华州地理信息匹配

Table 3 Comparison of Dalian and Delaware in geographic information

	纬度	经度	海拔/m		平均温度/°C			年平均 降水量/mm	气候
			平原	山地	年平均	最低1月	最高8月		
大连市	38°43'N— 40°10'N	120°58'E— 123°31'E	20~60	1000~1500	12.1	-1.70	25.20	550~950 (60%~ 70%集中在夏季、 多暴雨)	暖温带大陆性季 风气候、冬无严 寒、夏无酷暑
特拉华州 (肯特县)	38°27'N— 39°50'N	75°20'W— 75°47'W	0~137	平均18	12.7	-5.00	26.20	1143(2月76、 8月142)	冬季温和、夏季 湿热

表4 燃油参数

Table 4 Fuel parameters

燃油类型	雷氏蒸气压力/ Psi	硫质量分数/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	MTBE 体积 分数/%	芳香烃体 积分数/%	烯烃体积 分数/%	苯体积 分数/%	E200	E300
国四汽油	9.86	50.00	15.01	60.00	25.00	1.00	26.39	73.19
国四柴油		50.00						

长为3600 s,共获得80组速度、流量数据。

在MOVES模型中除上述参数外,其他参数采用系统默认值<sup>[16]</sup>。

### 3 排放测算与结果分析

针对每种试验方案,在MOVES模型中依次输入每次VISSIM仿真1h得到的速度、流量等数据,设定排放测算情景为早上8:00—9:00来计算整个试验交叉口的排放,从而获得以上3种车型基于路段的NO<sub>x</sub>、CO、HC的排放量和排放因子。

#### 3.1 正交试验分析

经统计可得上述16种试验方案分别仿真5次所得的不同车型不同污染物的排放量、每种车型的总行驶里程、多次仿真所得的平均值。正交试验设计使得各方案之间许多因素的水平不同,差异性较大而不具直接可比性,只能通过正交试验分析得出每个因素对排放量的影响。由于16种试验方案中每种方案均有5种测算结果,将其视为重复试验,通过SPSS软件进行多因素方差分析。分析中,NO<sub>x</sub>、CO、HC排放量为因变量;温湿度、坡度、中型车比例、公交车比例、交通需求为固定因子;仅考虑这些固定因子的主效应;选择可处理主效应和交互效应的Ⅲ型离差平方和。有重复试验的多因素方差分析的效应模型为

$$E_{\delta\sigma\varphi\theta\tau}^p = \bar{E}^p + H_{\delta}^p + G_{\sigma}^p + M_{\varphi}^p + B_{\theta}^p + T_{\tau}^p + \varepsilon_{\delta\sigma\varphi\theta\tau}^p \quad (2)$$

式中:  $\sum_{\delta} H_{\delta}^p = 0$ ;  $\sum_{\sigma} G_{\sigma}^p = 0$ ;  $\sum_{\varphi} M_{\varphi}^p = 0$ ;  $\sum_{\theta} B_{\theta}^p =$

$0$ ;  $\sum_{\tau} T_{\tau}^p = 0$ ;  $P \in \{NO_x, CO, HC\}$ ;  $\delta \in \{1, 2, 3, 4\}$ ;  $\sigma \in \{1, 2, 3, 4\}$ ;  $\varphi \in \{1, 2, 3, 4\}$ ;  $\theta \in \{1, 2, 3, 4\}$ ;  $\tau \in \{1, 2, 3, 4\}$ ;  $h \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ ;  $E_{\delta\sigma\varphi\theta\tau}^p$ 、 $\varepsilon_{\delta\sigma\varphi\theta\tau}^p$  分别为第 $\delta$ 水平温湿度、第 $\sigma$ 水平坡度、第 $\varphi$ 水平中型车比例、第 $\theta$ 水平公交车比例、第 $\tau$ 水平交通需求下第 $h$ 次试验污染物P的排放量(g)及其误差;  $\bar{E}^p$ 为污染物P的平均排放量,g;  $H_{\delta}^p$ 、 $G_{\sigma}^p$ 、 $M_{\varphi}^p$ 、 $B_{\theta}^p$ 、 $T_{\tau}^p$ 分别为第 $\delta$ 水平温湿度、第 $\sigma$ 水平坡度、第 $\varphi$ 水平中型车比例、第 $\theta$ 水平公交车比例、第 $\tau$ 水平交通需求对污染物P排放量的效应。

污染物P排放量的各项离差平方和为

$$S_t^p = \sum_{i=1}^n \sum_{h=1}^l (E_{ih}^p - \bar{E}^p)^2 \quad (3)$$

$$S_j^p = \frac{\sum_{k=1}^{m_j} \sum_{h=1}^l (E_{jhk}^p)^2}{r_j l} - \frac{1}{nl} \left( \sum_{i=1}^n \sum_{h=1}^l E_{ih}^p \right)^2 \quad (4)$$

$$S_e^p = S_t^p - \sum_{j=1}^w S_j^p \quad (5)$$

式中:  $\bar{E}^p = \frac{1}{nl} \sum_{i=1}^n \sum_{h=1}^l E_{ih}^p$ ;  $j \in \{1, 2, \dots, w\}$ ;  $k \in \{1, 2, \dots, m_j\}$ ;  $S_t^p$ 为污染物P排放量的总离差平方和;  $S_j^p$ 为第 $j$ 个因素污染物P排放量的离差平方和;  $S_e^p$ 为污染物P排放量误差的离差平方和;  $E_{ih}^p$ 为第 $i$ 种试验方案重复第 $h$ 次试验的污染物P排放量,g;  $n$ 为试验方案数;  $l$ 为试验重复次数;  $m_j$ 为第 $j$ 个因素的水平数;  $E_{jhk}^p$ 为第 $j$ 个因素第 $k$ 种水平重复

第  $h$  次试验对应的污染物 P 排放量之和,  $g_j$ ;  $r_j$  为第  $j$  个因素每个水平的重复次数;  $w$  为正交试验中因素的个数。

采用  $F$  检验,其统计量为

$$F_j^p = \frac{S_j^p / f_j}{S_e^p / f_e} \quad (6)$$

式中:  $f_j = m_j - 1$ ;  $f_e = n(l - 1)$ ;  $F_j^p$  为污染物 P 排放量

第  $j$  个因素的  $F$  检验统计量;  $f_j$  为第  $j$  个因素污染物 P 排放量离差平方和的自由度;  $f_e$  为误差离差平方和的自由度。

方差分析结果如表 5 所示,由此可见,对于  $\text{NO}_x$ 、CO、HC 排放量,模型的判决系数分别为 0.991、0.986、0.984,说明  $\text{NO}_x$ 、CO、HC 排放量的变异完全能由温湿度、坡度、中型车比例、公交车比例、

表 5 方差分析结果

Table 5 Results of analysis of variance

因变量	项目	离差平方和/10 <sup>6</sup>	自由度	均方/10 <sup>5</sup>	F 统计量	概率水平
NO <sub>x</sub> 排放量	模型	228.63	15	152.42	4.74	0.00
	截距	280.04	1	2 800.44	8.71	0.00
	温湿度	17.66	3	58.87	1.83	0.00
	坡度	28.69	3	95.64	2.97	0.00
	中型车比例	6.75	3	22.49	7.00	0.00
	公交车比例	107.01	3	356.71	1.11	0.00
	交通需求	68.52	3	228.39	7.10	0.00
	误差	2.06	64	0.32		
	总计	510.73	80			
CO 排放量	模型	579.46	15	386.31	311.51	0.00
	截距	3 825.77	1	38 257.65	30 850.74	0.00
	温湿度	19.94	3	66.46	53.60	0.00
	坡度	70.35	3	234.50	189.10	0.00
	中型车比例	5.45	3	18.16	14.64	0.00
	公交车比例	21.60	3	71.99	58.05	0.00
	交通需求	462.13	3	1 540.42	1 242.18	0.00
	误差	7.94	64	1.24		
	总计	4 413.16	80			
HC 排放量	模型	4.75	15	3.16	265.02	0.00
	截距	13.05	1	130.50	10 927.65	0.00
	温湿度	0.15	3	0.51	42.57	0.00
	坡度	0.66	3	2.19	183.70	0.00
	中型车比例	0.11	3	0.37	30.74	0.00
	公交车比例	1.14	3	3.79	317.10	0.00
	交通需求	2.69	3	8.97	751.00	0.00
	误差	0.08	64	0.01		
	总计	17.87	80			

交通需求来解释. 此外, 这些因素的 F 检验统计量对应的概率水平都为 0.00, 均远远小于 0.05 的显著性水平, 这表明这些因素对  $\text{NO}_x$ 、CO、HC 排放量的影响十分显著. 通常, 一个因素的离差平方和越大说明这个因素对因变量的影响越大. 通过比较各因素的离差平方和, 影响  $\text{NO}_x$  排放量的因素从重到轻依次为公交车比例、交通需求、坡度、温湿度、中型车比例, 影响 CO 排放量的因素从重到轻依次为交通需求、坡度、公交车比例、温湿度、中型车比例, 影响 HC 排放量的因素从重到轻依次为交通需求、公交车比例、坡度、温湿度、中型车比例.

进一步采用极差分析讨论单个因素对  $\text{NO}_x$ 、CO、HC 排放量的影响, 如表 6 所示. 结果发现, 各

因素对 HC 排放量的影响程度与方差分析一致; 方差分析认为温湿度比坡度对  $\text{NO}_x$  排放量影响大, 而极差分析认为坡度比温湿度对其影响大; 方差分析认为公交车比例比温湿度对 CO 排放量影响大, 而极差分析结果相反.

上述因素随水平变化的趋势如图 3 所示. 可以看出, 排放量最高的是 CO, 其次为  $\text{NO}_x$ , 最低的是 HC; 与其他季节相比, 夏季时  $\text{NO}_x$  排放量明显偏低而 CO 排放量明显偏高, 冬季时  $\text{NO}_x$  排放量明显偏高; 随着坡度增大,  $\text{NO}_x$ 、CO、HC 排放量逐渐增加; 随着公交车比例提高,  $\text{NO}_x$  排放量逐渐上升且不断加快; 随着交通需求变大,  $\text{NO}_x$ 、CO、HC 排放量都逐渐增多且变化速度加快.

表 6 极差分析结果  
Table 6 Results of range analysis

因变量	项目	影响因素				
		温湿度	坡度	中型车比例	公交车比例	交通需求
$\text{NO}_x$ 排放量	水平 1 均值/g	2 496.15	1 252.70	2 307.45	547.55	882.25
	水平 2 均值/g	1 907.00	1 292.20	1 491.15	1 161.25	1 256.65
	水平 3 均值/g	1 171.35	2 448.20	1 820.30	2 170.40	2 045.60
	水平 4 均值/g	1 909.40	2 490.80	1 865.00	3 604.70	3 299.40
	极差/g	1 324.80	1 238.10	816.30	3 057.15	2 417.15
	排序	3	4	5	1	2
CO 排放量	水平 1 均值/g	6 917.15	5 786.40	7 203.60	6 447.00	4 071.45
	水平 2 均值/g	6 550.75	6 232.20	6 506.95	6 393.30	5 564.35
	水平 3 均值/g	7 728.50	7 562.15	6 888.10	7 189.75	7 530.45
	水平 4 均值/g	6 465.00	8 080.65	7 062.75	7 631.35	10 495.15
	极差/g	1 263.50	2 294.25	696.65	1 238.05	6 423.70
	排序	3	2	5	4	1
HC 排放量	水平 1 均值/g	463.45	311.95	450.05	274.60	206.15
	水平 2 均值/g	408.55	315.50	346.65	317.60	281.80
	水平 3 均值/g	340.20	480.20	405.05	443.10	442.60
	水平 4 均值/g	403.35	507.90	413.80	580.25	685.00
	极差/g	123.25	195.95	103.40	305.65	478.85
	排序	4	3	5	2	1

### 3.2 坡度与排放因子回归分析

在同一方案中, 南北向道路水平而东西向道路坡度有 4 种水平; 为保证道路的平滑性, 在交叉口内部道路坡度会出现其他值. 同时, MOVES 软件的计

算结果是基于路段的, 所以一种方案中存在不同坡度所得的排放因子, 那么可以针对每一试验方案比较坡度对排放的影响, 并选择具有可比性的排放因子进行分析. 在一定时间间隔内, 一条路段上某类

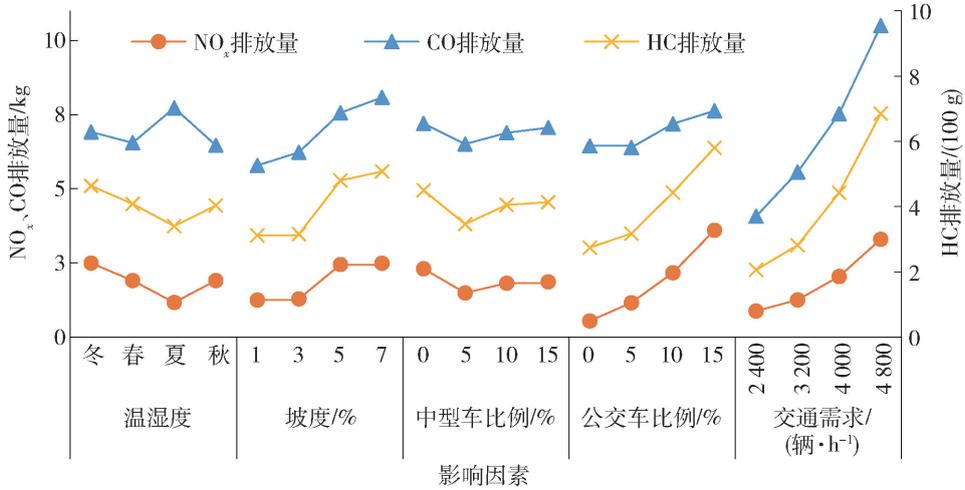


图3 因素水平趋势

Fig. 3 Trend graph of various levels per factor

车型某种污染物的排放因子为

$$EF_{\alpha}^{P,T} = \frac{E_{\alpha}^{P,T}}{VKT_{\alpha}}, \quad VKT_{\alpha} = \sum_{\alpha} L_{\alpha} V_{\alpha} \quad (7)$$

式中:  $EF_{\alpha}^{P,T}$  为路段  $\alpha$  上  $T$  类车型污染物  $P$  的排放因子,  $g/(km \cdot \text{辆})$ ;  $E_{\alpha}^{P,T}$  为路段  $\alpha$  上  $T$  类车型污染物  $P$  的排放量,  $g$ ;  $VKT_{\alpha}$  为路段  $\alpha$  上车辆的行驶里程,  $km \cdot \text{辆}$ ;  $L_{\alpha}$  为路段  $\alpha$  的长度,  $km$ ;  $V_{\alpha}$  为路段  $\alpha$  的机动车通过量, 辆。

针对每种试验方案下每种车型每种污染物,绘制了排放因子与坡度的各类散点图。结果发现,各类排放因子在进口道上明显高于在非进口道上,这是由大量车辆在进口道上减速停止和加速起步造成的。因此,区分进口道与非进口道,对同一坡度下获得的排放因子求取其平均值,然后绘制排放因子与坡度的折线图。以方案1为例,坡度对不同车型不同污染物所得排放因子的影响如图4所示。可见,无论进口道上还是非进口道上,每种车型每种污染物的排放因子随坡度增加而增加,其他方案也大多呈现此规律,但方案3、5、12、16的非进口道上排放因子与坡度的关系可能呈“W”型,其出现概率约15%。呈“W”型的原因可能在于交通需求过大致使坡度对排放因子的影响减弱,其中某些排放因子随着坡度增加先减少后增加,再减少再增加。

对于每种车型每种污染物,将坡度和排放因子分别作为自变量和因变量,其线性回归方程为

$$EF^{P,T} = aG + b \quad (8)$$

式中:  $EF^{P,T}$  为  $T$  类车型污染物  $P$  的排放因子,  $g/(km \cdot \text{辆})$ ;  $G$  为坡度值;  $a$  为回归系数;  $b$  为常数。

其求解形式为

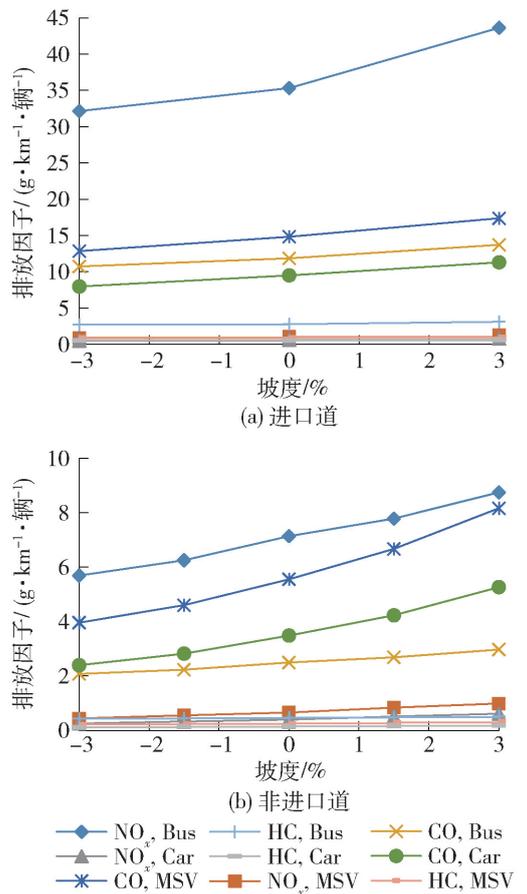


图4 方案1坡度对排放因子的影响

Fig. 4 Effects of grade on emission factors for plan 1

$$\begin{pmatrix} EF_1^{P,T} \\ EF_2^{P,T} \\ \vdots \\ EF_n^{P,T} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & G_1 \\ 1 & G_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & G_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b \\ a \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中:  $EF_n^{P,T}$  为在第  $n$  种坡度值下  $T$  类车型污染物  $P$  的排放因子;  $G_n$  为第  $n$  种坡度值;  $\varepsilon_n$  为第  $n$  种坡度值下的回归误差。

各方案下各类排放因子和坡度的回归系数如图 5 所示。可以看出, 公交车  $\text{NO}_x$  排放因子对坡度变化最为敏感, 其次是公交车、中型车、小汽车的 CO 排放因子, 而中型车、小汽车的  $\text{NO}_x$  排放因子以及各车型 HC 排放因子对坡度不太敏感。通过计算, 坡度每增加 1%, 进口道上公交车  $\text{NO}_x$  和中型车 CO 的排放因子分别增加 3 ~ 12 g/(km·辆) 和 1 ~ 4 g/(km·辆), 而非进口道上这些值分别仅增加 0.9 ~ 6.0 g/(km·辆) 和 1.6 ~ 3.0 g/(km·辆), 其他排放因子也呈现相似规律, 可见进口道上排放因子波动性较强。

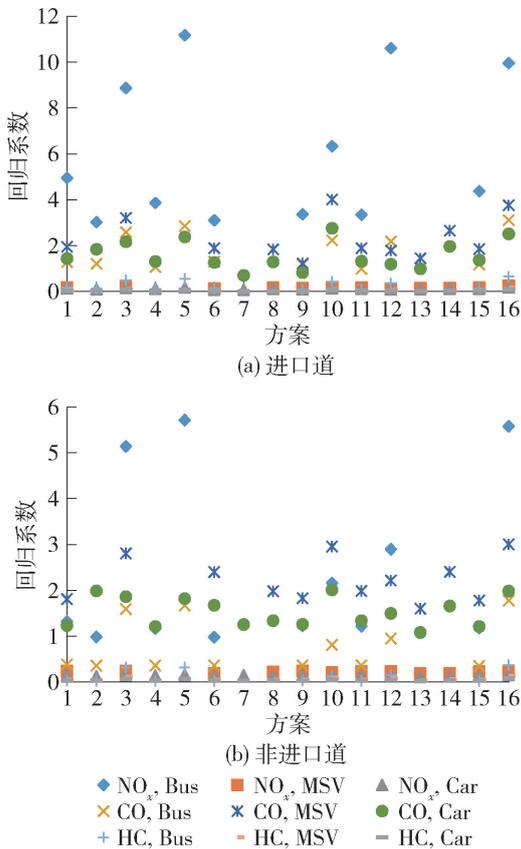


图 5 排放因子和坡度的回归系数

Fig. 5 Regression coefficients of emission factors with grade

### 3.3 进口道与非进口道对比分析

根据上述分析, 排放因子在进口道上明显不同于在非进口道上。为对比两者之间的差异, 对每种车型每种污染物分别计算进口道上和非进口道上的排放因子比值和回归系数比值, 如图 6 所示。可以看出, 排放因子比值与回归系数比值均大于 1, 说明

排放因子及其随坡度的变化率在进口道上高于在非进口道上, 其中公交车 HC 和  $\text{NO}_x$  的这 2 个比值较高(分别约为 6 和 5), 中型车和小汽车  $\text{NO}_x$  的这 2 个比值较小(均约为 1.5)。不同方案下排放因子比值及回归系数比值相近(均为 1.5 ~ 6.5), 但方案 3、5、13、16 对应的各车型各污染物的排放因子比值和回归系数比值较小(分别为 1.5 ~ 3.0 和 1.5 ~ 4.0)。由于正交试验方案中考虑的因素较多, 这里不易辨别产生此现象的具体原因。

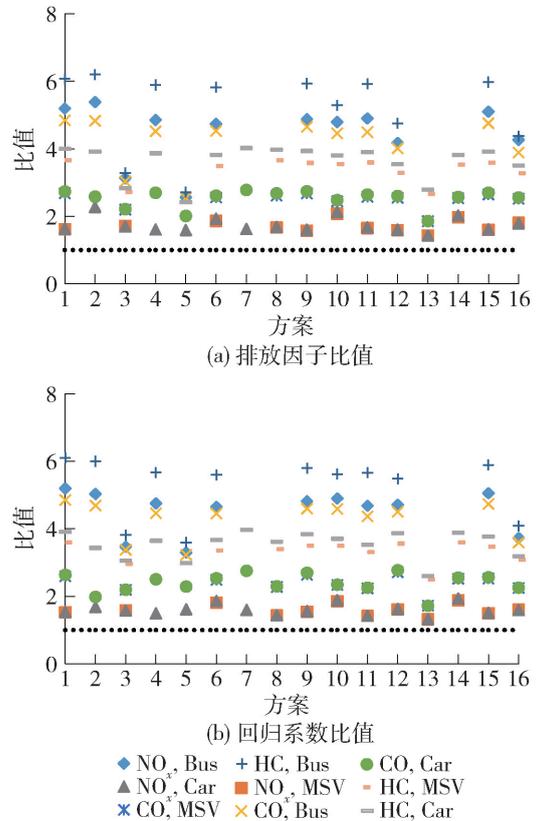


图 6 进口道与非进口道的对比分析

Fig. 6 Comparative analysis for approaches and non-approaches

### 3.4 不同排放阶段排放因子分析

以上正交试验是基于大连市的基础数据采用 MOVES 软件来计算机动车排放, 但除了温湿度、坡度、车辆组成、交通需求以及路段位置会引起机动车排放的变化外, 不同排放阶段由于燃油参数及排放标准不同也对排放有着重要的影响。正交试验设计时汽油和柴油都只考虑了国四排放阶段, 选取上述 16 种试验方案中最具代表性的 3 种方案 4、15、5 (排放分别为最低、中等、最高) 来分析不同排放阶段对排放因子的影响。因为对每种方案使用 VISSIM 仿真 5 次并获得 5 组数据, 所以每种方案也都用

MOVES 软件计算 5 次在燃油(包括汽油和柴油)分别为国三、国四、国五、国六 4 种排放阶段下的排放因子,分析各方案 5 次排放因子的平均值,结果如图 7 所示。

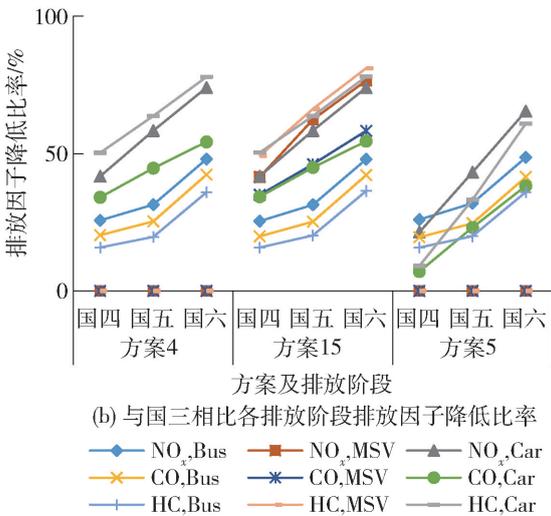
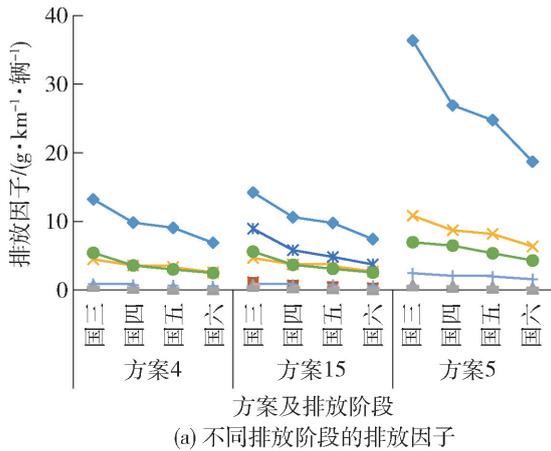


图 7 不同排放阶段排放因子分析

Fig. 7 Analysis of emission factors under different emission stages

由图 7(a)可知,随着排放阶段由国三过渡至国六,以上 3 种方案对应的每种车型的各污染物排放因子均在逐渐降低.为清晰对比其降低幅度,绘制了不同排放因子在国四、国五、国六阶段相比国三阶段降低的比率,如图 7(b)所示,可得除方案 4 和 5 的中型车各类排放因子外(因这 2 种方案均无中型车),其余方案的各排放因子都大幅度降低,而且降低幅度随排放阶段逐渐过渡而增加.例如,方案 4 小汽车的 HC 排放因子在国四、国五、国六阶段比国三阶段分别降低了 50.3%、63.7%、77.9%.总体来看,国四、国五、国六阶段下各车型各污染物排放因子比国三阶段平均降低了 27.5%、38.8%、54.9%。

## 4 结论

1) 温湿度、坡度、中型车比例、公交车比例、交通需求对 NO<sub>x</sub>、CO、HC 排放量都有显著影响.各排放量均随坡度、公交车比例、交通需求的增加而增加.CO 排放量在夏季尤其高,冬季其次;NO<sub>x</sub> 和 HC 排放量均在夏季最低、冬季偏高;春、秋季因温湿度差异不大使各污染物排放量没有明显差别.

2) 一般来说,各车型的 NO<sub>x</sub>、CO、HC 排放因子随着下坡坡度的减小和上坡坡度的增加而增加.公交车 NO<sub>x</sub> 排放因子对坡度变化最为敏感,其次是各车型的 CO 排放因子,而其他情况下排放因子对坡度不大敏感.

3) 对任意车型任意污染物,进口道上排放因子显著高于非进口道上排放因子,而且排放因子对坡度的变化率在进口道上也明显高于在非进口道上.

4) 对任意车型任意污染物,排放阶段由国三过渡至国六,各车型各污染物排放因子显著降低.

5) 夏季应重点控制 CO 排放,冬季应重点控制 NO<sub>x</sub> 排放;因为使用柴油的公交车排放的 NO<sub>x</sub> 对排放总量的贡献很大,应大力发展新能源公交车以减少交通排放;交通排放对交通需求最为敏感,应采取多种措施着力解决高峰期的交通供需矛盾;道路坡度对交通排放也有较大影响,应更科学地设计城市道路线型及其各项参数,尤其在交叉口进口道处;严格遵守国家相应燃油标准,并积极提升燃油性能以过渡至排放更低的阶段.

6) 上述结果来自正交试验方案,由于所考虑的因素和水平有限,其中一些特例还不能得到很好的解释,且无法明确以上因素影响交通排放的深层次原因.此外,本研究仅分析了一个交叉口,后续将面向城市路网,使用更多的试验数据来分析更多因素对交通排放的影响,并进一步解析这些因素与车辆排放的内在关系.

## 参考文献:

[1] 中华人民共和国环境保护部. 2015 年中国机动车污染防治年报[EB/OL]. (2016-01-15) [2017-11-18]. <http://dqhj.mep.gov.cn/jdchjgl/zhgldt/201605/P020160513584304398771.pdf>.

[2] 郭栋,赵韩涛,王晓原,等.实际道路运行工况下轻型车排放特征研究[J].北京理工大学学报,2013,33(12):1279-1283.

GUO D, ZHAO H T, WANG X Y, et al. Study on characteristics of light-duty vehicle emission based on

- actual operation conditions [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(12): 1279-1283. (in Chinese)
- [3] 王燕军, 吉喆, 尹航, 等. 重型柴油车污染物排放因子测量的影响因素[J]. 环境科学研究, 2014, 27(3): 232-238.  
WANG Y J, JI Z, YIN H, et al. Study of parameters influencing measurement on heavy duty diesel vehicle's emission factors [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(3): 232-238. (in Chinese)
- [4] GALLUS J, KIRCHNER U, VOGT R, et al. Impact of driving style and road grade on gaseous exhaust emissions of passenger vehicles measured by a portable emission measurement system (PEMS) [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 52: 215-226.
- [5] DELAVARRAFIEE M, FREY H C. Real-world fuel use and gaseous emission rates for flex fuel vehicles operated on E85 versus gasoline [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2018, 68(3): 235-254.
- [6] 黄文伟, 强明明, 孙龙林, 等. 基于 MOVES 的车辆排放因子测试[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(1): 140-148.  
HUANG W W, QIANG M M, SUN L L, et al. Emission factor measurement of vehicles based on MOVES [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(1): 140-148. (in Chinese)
- [7] 郭栋, 高松, 邹广德, 等. 城市区域机动车排放定量评价方法[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(1): 72-78.  
GUO D, GAO S, ZOU G D, et al. Quantitative evaluation method of vehicle emission in urban region [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(1): 72-78. (in Chinese)
- [8] FERNANDES P, COELHO M C, ROUPHAIL N M. Assessing the impact of closely-spaced intersections on traffic operations and pollutant emissions on a corridor level [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 54: 304-320.
- [9] YU Q, LI T Z, LI H. Improving urban bus emission and fuel consumption modeling by incorporating passenger load factor for real world driving [J]. Applied Energy, 2016, 161: 101-111.
- [10] 刘莹, 陈艳艳, 程颖, 等. 基于交通指数的机动车污染物排放分析方法研究——以北京为例[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(3): 422-427.  
LIU Y, CHEN Y Y, CHENG Y, et al. Research of the analysis method of vehicle pollutant emissions associated with traffic index—taking Beijing as an example [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(3): 422-427. (in Chinese)
- [11] FENG X, WANG T L, ZHAO Q. The application of the IVE model for establishing the vehicle emission inventory in the urban areas of Chongqing [J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 361/362/363: 854-859.
- [12] 郭园园. MOVES-深圳模型的构建及其模拟机动车排放因子的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.  
GUO Y Y. Construction of MOVES-Shenzhen model and application of simulate vehicle emission factors [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [13] 郭园园, 曹罡, 朱荣淑. 基于深圳本土化 MOVES 模型微观层次敏感性分析[J]. 交通信息与安全, 2015, 33(2): 116-123.  
GUO Y Y, CAO G, ZHU R S. A micro level sensitivity analysis of Shenzhen-localized MOVES model [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2015, 33(2): 116-123. (in Chinese)
- [14] ABOU-SENNA H, RADWAN E. VISSIM/MOVES integration to investigate the effect of major key parameters on CO<sub>2</sub> emissions [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2013, 21: 39-46.
- [15] 大连市统计局. 大连市统计年鉴 2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016: 10.
- [16] Environmental Protection Agency (EPA). User guide for MOVES2014 EPA-420-B-14-055 [R]. Washington D C: Assessment and Standard Division Office of Transportation and Air Quality, 2014.

(责任编辑 杨开英)