

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.12.018

基于 MOVES 的小半径圆曲线路段载重 柴油车碳排放预测模型

许金良, 景立竹, 韩跃杰, 燕孟华
(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 半径小于等于 550 m 的圆曲线路段是车辆易产生高碳排的路段。为揭示载重柴油车在这些小半径圆曲线路段的二氧化碳排放水平变化规律, 以 MOVES 模型为基础, 应用符合我国实际情况的道路、交通、车辆、燃油等信息, 对 MOVES 模型中的参数做本地化修正及设置。通过采用 MOVES 模型进行载重柴油车碳排放模拟, 得到了不同平面线形及行驶速度组合条件下的碳排量数据库。在此基础上, 首先采用回归分析的方法分别建立了单位圆曲线长碳排量与圆曲线半径、圆曲线长度、车辆驶入圆曲线路段的初始速度 3 个参数的关系模型, 其次采用迭代的方法建立了小半径圆曲线路段载重柴油车累积碳排放量预测模型。通过实地油耗试验, 选用 IPCC 碳排放核算方法, 将车辆油耗数据转换成碳排放数据, 对比了碳排量核算值与模型预测值, 验证了模型的预测精度。结果表明: 单位圆曲线长碳排量以圆曲线半径、车辆驶入圆曲线路段的初始速度这 2 个参数分别为变量作二次函数形式的变化, 以圆曲线长度为变量作幂函数形式的变化; 累积碳排量以上述 3 个参数为变量作多元非线性函数形式的变化; 经过参数本地化修正及设置的 MOVES 模型可以用于我国实际道路交通条件下的载重柴油车碳排放水平预测, 以 MOVES 模拟为基础而建立的多元碳排量模型预测值与试验实测值的相对误差平均值为 6.02%, 小于 10%, 具有较高的预测精度, 可以在无需借助 MOVES 模型的情况下方便、快速地估算载重柴油车在小半径圆曲线路段的碳排量。

关键词: 道路工程; 碳排放; MOVES; 载重柴油车; 小半径圆弯道; 预测模型

中图分类号: U412; X734

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2018) 12-0124-08

A Carbon Emission Prediction Model for Heavy-duty Diesel Trucks in Small-radius Curves Based on MOVES

XU Jin-liang, JING Li-zhu, HAN Yue-jie, YAN Meng-hua
(School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China)

Abstract: When the radius of a horizontal curve is no greater than 550 m, vehicles are prone to generate high carbon emissions. To reveal the rule of heavy-duty diesel trucks' carbon dioxide emissions on these small-radius curve sections, based on the MOVES model and using the information related to the road, traffic, vehicle, fuel, etc. in accordance with China's actual conditions, the parameters in MOVES model are modified and set through parameter localization. The carbon dioxide emissions of heavy-duty diesel trucks are simulated in MOVES, and a carbon emission database of different combinations of horizontal alignments and driving speeds is obtained. On this basis, first, regression analysis is used to establish the relational models between carbon emission per unit curve length and curve radius, curve length, initial speed of vehicle entering into curve respectively. Second, the iterative method is used to establish the prediction model of accumulated carbon emission of heavy-duty diesel trucks on small-radius curves. Through field fuel

收稿日期: 2018-07-30

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0802208); 陕西省自然科学基金项目 (2017JQ5122)

作者简介: 许金良 (1966-), 男, 山东曹县人, 教授, 博士生导师, 工学博士. (gl15@chd.edu.cn)

consumption tests and IPCC carbon emission accounting method, the vehicle fuel consumption is converted into the calculated carbon emission, which is compared with the predicted carbon emission to verify the prediction accuracy. The result shows that (1) The carbon emission per unit curve length changes with the curve radius and initial speed of vehicle entering into curve in the forms of quadratic functions, and changes with the curve length in the form of power function. (2) The accumulated carbon emission changes with these 3 parameters in the form of multivariate nonlinear function. (3) The MOVES model modified and set through parameter localization could be used to predict the carbon emission levels of heavy-duty diesel trucks under actual road and traffic conditions in China. The average relative error between the predicted value of the multivariate model, which is established based on MOVES simulation, and the experimental measured values is 6.02%, less than 10%, which proves that the prediction model has a high prediction accuracy, and can be applied to estimate carbon emission of heavy-duty diesel trucks in small-radius curves conveniently and quickly without using the MOVES model.

Key words: road engineering; carbon emission; MOVES; heavy-duty diesel truck; small-radius curve; prediction model

0 引言

根据我国“十三五”发展规划的要求,控制二氧化碳排放是各行业现阶段的核心目标之一。交通运输行业作为碳排放的重要来源^[1-2],需进一步研究节能减排的新思路、新技术、新举措。目前交通运输行业的碳排放主要来自机动车尾气,尤其是载重柴油车^[3],由于其载重量大、动力性能强,且部分车辆存在使用年限较长、尾气排放不达标的问题,油耗水平和碳排放水平远高于小客车^[4-5],已然成为道路碳排放中不可忽视的一部分。除了发动机性能与燃油品质,道路条件和交通状况亦是影响载重柴油车行驶速度、加减速状态的重要因素,对其燃油消耗及尾气排放水平也有着决定性作用^[6-7]。明确不同因素对载重汽车碳排放水平的影响规律,提出准确可靠的碳排放预测方法,对于预判车辆污染水平、有的放矢地采取污染控制策略有着重要意义。

目前,国内外学者已经在微观、中观、宏观层面上,针对不同变量条件建立了载重汽车碳排放预测模型。贾洪飞等人采用实证对比分析法提出了不同纵坡条件、不同运行速度下的柴油油耗调整系数^[8]。章后忠等人以及彭勃分别采用不同的数据收集方法,实地采集了大量载重汽车油耗数据,分析了车速、道路纵坡、路面平整度等因素对碳排放水平的影响程度^[9-10]。刘真基于现场实测数据,建立了车速与道路线形之间的定量关系,提出了基于行车速度和路面摩阻力系数的燃油消耗量估算方法^[11]。孙文圃等人运用MOVES模型对载重柴油车在纵坡路段的碳排放情况进行了模拟,建立了高速公路纵坡段非线性碳排

放回归模型^[12]。Ko等人提出了一种针对不同纵断面线形的可计算多种污染气体排放量的模型^[13]。Jiao等人得到了以机动车行驶速度、机动车类型、交通状态、道路纵坡为自变量的机动车碳排放影响因子确定模型,并推导出最小碳排放因子所对应的最佳道路纵坡设计方案^[14]。Abou-Senna等人、Huisinigh等人分别通过实地数据采集和软件仿真的方法,考虑了气象条件、车辆类型、公路等级、路线线形、交通流状态等因素,建立了车辆尾气排放率预测模型以及公路空气污染状况综合评价模型^[15-16]。

总结上述文献可以得知,相比国内学者,国外学者针对不同层次的碳排放预测模型的研究更为全面。宏观层面上,提出了综合天气状况、交通流条件、道路平纵线形等多种因素的碳排放估算方法;中微观层面上,着重研究了道路纵断面设计要素对车辆碳排放水平的影响规律,但是缺少对平面线形指标影响作用的分析。国内学者对碳排放预测模型的研究多于早年开展,且研究成果集中于中微观层面上,着重关注道路纵断面线形及路面平整程度对碳排放的影响,忽视了平面线形条件的作用。

为解决上述道路平面设计要素对车辆碳排放影响作用尚不明确的问题,本研究将从微观视角出发,探究道路平面线形指标与车辆碳排放水平的相关关系。国内外研究成果已经证明,相比于直线路段,车辆在圆曲线路段的加减速行为更为频繁,尤其是当圆曲线半径小于等于550 m时,半径对行驶速度及加减速过程的影响将非常显著^[17-19],且车辆发动机动力输出也将明显区别于一般路段,车辆油耗和碳排放水平普遍较高。由此可以推断,圆曲线路段,尤其是半

径小于等于 550 m 的小半径圆曲线路段是车辆易产生高碳排的路段。此外,考虑到载重柴油车污染气体的排放水平远高于小客车,故将以载重柴油汽车作为研究对象,首先对国外已有碳排放预测模型的参数做必要校准,使之能够适用于我国实际的道路交通条件及车辆条件;之后,采用软件仿真的方法研究载重汽车在小半径圆曲线路段的碳排放变化规律,建立碳排放预测模型,实现在无需借助软件计算的情况下方便、快速地预测小半径圆曲线路段车辆碳排放水平的目的。

1 模拟参数修正及数据库建立

美国国家环保局于 2004 年开发的 MOVES 机动车尾气排放模型预测结果精度较高,可以实现对小客车、摩托车、载重汽车、公共汽车等不同车型的碳排放水平预测,在机动车尾气排放水平预测及空气质量评估等方面得到了广泛应用^[20-22]。本研究将以符合我国实际情况的本地化参数作为 MOVES 的基础模拟参数,通过仿真模拟建立碳排放数据库,作为后续回归分析的数据基础。

1.1 模型参数的本地化

MOVES 模型的原始数据库是以美国各个州县机动车排放数据为基础而建立的,直接用来预测我国机动车碳排放水平是不合理的。为了减小软件参数设置对本研究结果的影响程度,保证预测精度,文中在分析 MOVES 模型主体结构及计算原理的基础上,调查了我国现阶段的车辆分类标准、燃油特性、载重汽车尾气排放控制标准、车辆检测与维护情况等,并与美国的具体情况相对比,应用符合我国实际情况的道路、交通、车辆、燃油等信息合理修正了 MOVES 微观层次上模拟机动车排放水平所需输入的一系列参数。从合理修正原始参数和正确设计模拟情景两方面进行考虑,本地化的参数设置汇总如下:

(1) 模拟规模:微观层次;

(2) 模型计算年份:相比于美国,我国在柴油排放检测及控制标准制定方面有一定程度的落后。将我国第五阶段机动车污染物排放标准以及现阶段主要供应的柴油品质与美国进行对比,如表 1 所示,确定 2009 年为 MOVES 模型的计算年份。

(3) 道路类型:非限制出入的乡村道路,对应 MOVES 模型中代码为 3 的道路类型;

(4) 地理信息:MOVES 模型提供了美国 50 个州 3 000 余个地理区域供用户匹配建模所需的地理信息,本研究从影响模型计算值的经纬度、海拔、平均

气温、年均降水量、相对湿度等方面对照了陕西省和美国各州的具体情况,最终确定以密苏里州作为软件中的模拟地理区域;

表 1 中美两国柴油品质对比

Tab. 1 Comparison of diesel quality between China and USA

参数名称	中国 (2017 年标准, -20 [#] 柴油)	美国 (2009 年标准)
硫含量(质量分数)/(mg · kg ⁻¹)	≤10	≤10
10% 蒸余物残炭(质量分数)/%	≤0.3	≤0.3
灰分(质量分数)/%	≤0.01	≤0.01
多环芳烃含量(质量分数)/%	≤11	≤10
十六烷指数	≥46	50
运动黏度(20 ℃)/(mm ² · s ⁻¹)	2.5 ~ 8.0	2.0 ~ 7.0
密度(20 ℃)/(kg · L ⁻¹)	790 ~ 840	800 ~ 840

(5) 排放源类型:参考《机动车类型术语和定义》(GA 802—2014)对陕西省内省道 107、省道 108 进行车型分布情况调查和统计,结果表明,车身长度大于等于 6 000 mm 且最大允许总质量大于 12 000 kg 的重型载货汽车在载货汽车中所占比例最大,为 40.8%;与此同时,通过随机抽样调查 112 辆重型载货汽车的生产厂家、车型、车龄分布情况,车龄在 3 ~ 6 年范围内的一汽解放悍威某重型载货汽车所占比例最大。综合上述分析并考虑我国车型现状及未来发展趋势,文中选择以一汽解放悍威某重型载货汽车作为载重柴油车的代表车型,即主要碳排放源,对应 MOVES 模型中代码为 53 的排放源类型;

(6) 燃油类型:-20[#]柴油,对应 MOVES 模型中代码为 20043 的燃油;

(7) 车龄:平均车龄 4.5 年,对应 MOVES 模型中代码为 405 的车龄组合;

(8) 机动车检测和维修状况:采用 MOVES 模型缺省值;

(9) 车辆运行工况:MOVES 模型共设置有 77 种车辆运行工况,每种运行工况对应不同的碳排放速率和调整系数。为了实现对车辆排放水平的估算,需要首先根据机动车瞬时速度和瞬时比功率 VSP 值来查找运行工况代码,将车辆逐秒运行状态匹配到相应的运行工况中,然后由 MOVES 模型计算每个运行工况下的碳排放量,并将所有运行工况下的碳排放量相加,即可得到车辆在行驶过程中的累积碳排放量。VSP 的数值与车辆瞬时速度和瞬时加速度有关,计算公式如式 (1) 所示。

$$VSP = v \{ 1.1a + 9.807 [\operatorname{atan}(\sin\theta)] + 0.132 \} + 0.000302v^3, \quad (1)$$

式中, VSP 为机动车瞬时比功率; v 为车辆瞬时速度;

a 为车辆加速度; θ 为道路纵坡, 在本研究模拟计算过程中, 由于不考虑纵断面线形对车辆碳排放量的影响, 因此取 $\theta=0$ 。 v 和 a 的数值与圆曲线半径、进入圆曲线路段时的初始速度、和圆曲线起点或中点的距离、在圆曲线路段行驶的时间等因素有关, 在对比了多种速度和加速度预测模型各自的适用范围及优缺点, 并采用实测数据验证预测精度之后, 最终采用了 Fitzpatrick 等人在文献 [23] 中提出的取值和计算方法。

1.2 MOVES 碳排放数据库的建立

完成对 MOVES 中不变参数的设置后, 还需要设置可变参数。影响圆曲线路段机动车碳排放水平的可变参数有很多, 包括运行速度、圆曲线半径、圆曲线长度、超高、纵坡、竖曲线、路面条件、驾驶员驾驶技术、天气条件、风阻力等。其中, 速度以及平面线形指标是本研究的重点研究要素。由于道路超高的设置是以圆曲线半径和运行速度为基础的, 因此它并非一个独立的自变量。综上, 在分析载重柴油车在圆曲线路段上的碳排放规律时, 以车辆进入圆曲线路段的初速度 V_0 、圆曲线半径 R 、圆曲线长度 L 这 3 个因素为自变量, 建立载重柴油车的碳排放数据库及模型。

根据对陕西省内几条主要国省干线重型载重柴油车行驶速度的测量统计结果, 以车辆进入圆曲线路段初始速度的第 10 分位和第 90 分位数值分别作为建立数据库时 V_0 取值的上限和下限, 即 V_0 取值范围为 30 ~ 80 km/h, 变化步长 10 km/h。根据线形资料收集整理结果, 圆曲线长度取值范围设置为 0 ~ 600 m, 变化步长 50 m。另外, 为了保证行车安全, 实际道路条件下的圆曲线半径通常不会太小, 为减小计算量, 这里取圆曲线半径 200 m 作为 MOVES 模型计算的下限值, 550 m 为上限值, 变化步长 50 m。为避免平纵线形组合的影响, 这里将路段信息中的纵坡坡度均设置为 0%, 且不设置竖曲线。车道宽度、中央分隔带设置、路肩宽度等数据则参考路线设计类规范, 尽量取上限值或不影响车辆运行速度的数值。

根据式 (1) 计算不同线形组合条件下车辆的瞬时比功率数值。在计算过程中, 注意将上述 3 个自变量中的 2 个设置为固定值, 另 1 个按照变化步长依次取值。之后, 将对应的线形指标作为路段信息输入 MOVES 模型中, 将运行工况分布情况作为运行工况信息输入 MOVES 模型中, 计算得出所有运行工况下的累积碳排放量数据。将 3 因素依次作为变化量, 模拟计算所有的累积碳排放量数据, 即可建立 MOVES 碳排放数据库。

图 1 以坐标图的形式展示了圆曲线半径固定 200 m 时所建立的累积碳排放量数据库文件。

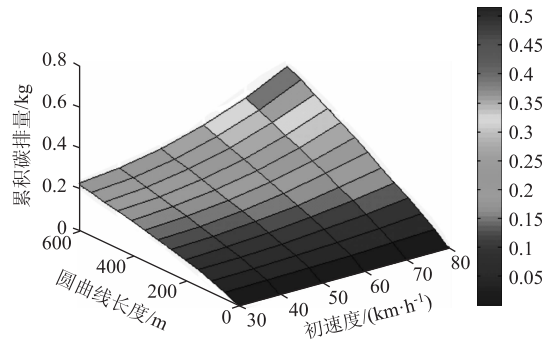


图 1 圆曲线半径等于 200 m 时累积碳排放量数据库

Fig. 1 Accumulated carbon emission database when curve radius is 200 m

2 载重柴油车碳排放预测模型建立

2.1 一元回归模型

完成数据库建立后, 即可应用其中数据展开回归分析。

为了直观地展示 3 个自变量对于车辆碳排放量的影响规律, 首先分别分析它们对碳排放量的独立影响作用。这里以单位圆曲线长的碳排放量为因变量, 其计算方法如式 (2) 所示, 分别建立圆曲线半径、圆曲线长度、车辆初速度与这一因变量的关系模型。

$$E_0 = \frac{E_c}{L}, \quad (2)$$

式中, E_0 为单位圆曲线长车辆碳排放量; E_c 为圆曲线长度范围内车辆的累积碳排放量; L 为圆曲线长度。

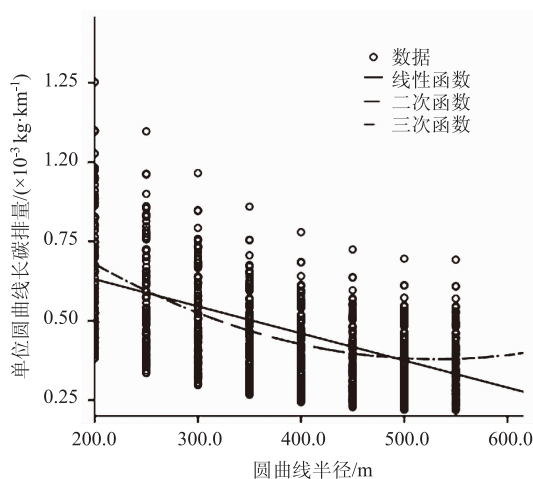
(1) 圆曲线半径 R 与单位圆曲线长碳排放量 E_0 关系模型

以 MOVES 碳排放数据库为数据来源, 绘制圆曲线半径 R 与单位圆曲线长碳排放量 E_0 散点图, 对数据做数理统计分析, 确定没有需要剔除的异常或可疑数据。利用 SPSS 软件对散点进行曲线拟合, 如图 2 所示。从判定系数 R^2 、赤池信息量 AIC 、贝叶斯信息量 BIC 、 F 检验、显著性检验这几个方面对不同形式函数的拟合效果做出评价, 如表 2 所示。

表 2 R 与 E_0 回归模型拟合效果对比

Tab. 2 Comparison of fitting results of $R-E_0$ regression model

函数形式	R^2	AIC	BIC	F	$Sig.$
线性函数	0.705	1 240.595 1	1 249.307 3	251.317	0.000
二次函数	0.736	1 205.411 2	1 214.130 4	144.850	0.000
三次函数	0.736	1 206.808 3	1 218.900 7	96.398	0.000

图2 R 与 E_0 拟合曲线Fig. 2 $R - E_0$ fitting curves

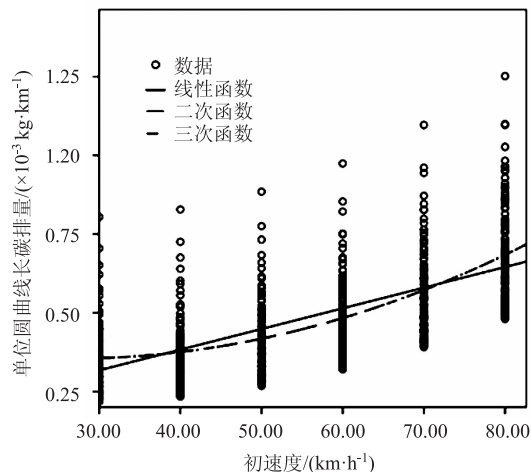
从表中各指标的大小来看, 3种函数的显著性水平都小于0.05, 说明在95%置信水平下方程回归显著。采用二次函数和三次函数拟合的判定系数相同, 但二次函数对应的 F 值更大, AIC 和 BIC 值更小, 能够在保证拟合精度的同时避免回归方程中参数的冗余。因此选择二次函数作为拟合函数, 建立的回归方程如式(3)。

$$E_0 = f_1(R) = (2.734 \times 10^{-6} R^2 - 0.003R + 1.150) \times 10^{-3}, \quad (3)$$

式中, E_0 为单位圆曲线长车辆碳排放量; R 为圆曲线半径。

(2) 车辆进入圆曲线路段的初始速度 V_0 与单位圆曲线长碳排放量 E_0 关系模型

图3所示为依据MOVES碳排放数据库所绘制的车辆初速度 V_0 与单位圆曲线长碳排放量 E_0 散点图及SPSS拟合曲线。拟合函数各项参数的对比见表3。

图3 V_0 与 E_0 拟合曲线Fig. 3 $V_0 - E_0$ fitting curves表3 V_0 与 E_0 回归模型拟合效果对比Tab. 3 Comparison of fitting results of $V_0 - E_0$

regression model					
函数形式	R^2	AIC	BIC	F	Sig.
线性函数	0.700	1 376.003 6	1 384.715 8	383.420	0.000
二次函数	0.727	1 345.320 4	1 357.454 2	213.564	0.000
三次函数	0.727	1 349.881 6	1 358.593 8	142.128	0.000

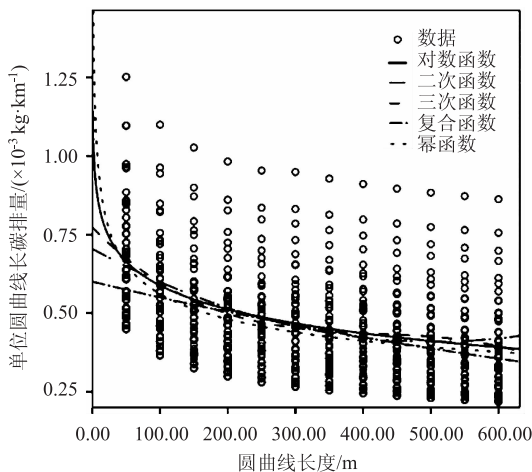
由表3可以看出, 在95%置信水平下, 3种回归方程都表现出良好的显著性。采用二次函数拟合效果最好, 由此得到的车辆初速度与单位圆曲线长碳排放量回归关系表达式为式(4)。

$$E_0 = f_2(V_0) = (1.160 \times 10^{-4} V_0^2 - 6.174 \times 10^{-3} V_0 + 0.437) \times 10^{-3}, \quad (4)$$

式中, E_0 为单位圆曲线长车辆碳排放量; V_0 为车辆驶入圆曲线时的初始速度。

(3) 圆曲线长度 L 与单位圆曲线长碳排放量 E_0 关系模型

运用SPSS对圆曲线长度 L 与单位圆曲线长碳排放量 E_0 数据散点做曲线拟合, 如图4所示。几种函数形式拟合效果对比见表4。

图4 L 与 E_0 拟合曲线Fig. 4 $L - E_0$ fitting curves表4 L 与 E_0 回归模型拟合效果对比Tab. 4 Comparison of fitting results of $L - E_0$ regression model

函数形式	R^2	AIC	BIC	F	Sig.
对数函数	0.735	1 541.162 8	1 549.875 1	144.738	0.000
二次函数	0.727	1 545.817 2	1 554.529 4	69.347	0.000
三次函数	0.726	1 540.243 4	1 548.955 7	48.452	0.000
复合函数	0.709	1 555.793 8	1 564.506 0	127.775	0.000
幂函数	0.738	1 520.216 6	1 528.928 8	151.041	0.000

采用幂函数拟合时对应的判定系数 R^2 值最大而 AIC , BIC 值最小, 且 F 检验、显著性检验均满足要

求, 因此选择幂函数作为圆曲线长度与单位圆曲线长碳排放量相关关系的拟合函数, 具体表达式如式 (5) 所示。

$$E_0 = f_3(L) = 1.556 \times 10^{-3} L^{-0.223}, \quad (5)$$

式中, E_0 为单位圆曲线长车辆碳排放量; L 为圆曲线长度。

2.2 多元回归模型

为了明确 3 个变量对载重柴油车在小半径圆曲线路段碳排放水平的综合影响作用, 建立三参数协同作用下的累积碳排放量预测模型, 这里采用多元回归的方法进行模型建立。以 2.1 节的 3 个一元模型的基本函数形式作为参考, 以圆曲线半径、圆曲线半径平

方、车辆初速度、车辆初速度平方、圆曲线长度、圆曲线长度幂次方作为自变量, 其系数分别取 α_1 , α_2 , β_1 , β_2 , γ_1 , γ_2 , 另外在模型中加入常数项 ε 。借助 SPSS 软件进行多元非线性迭代计算, 建立形式如式 (6) 所示的车辆累积碳排放量 E_c 计算模型。

$$E_c = L \times E_0 = L \times (\alpha_1 R + \alpha_2 R^2 + \beta_1 V_0 + \beta_2 V_0^2 + \gamma_1 L^2 + \varepsilon)。 \quad (6)$$

将上述自变量系数及常数项的初始值设定为 1.000, 置信水平设置为 95%, SPSS 迭代历程见表 5 (因篇幅有限, 其中若干过程在表格中以省略号表示), 参数估计结果及 T 检验见表 6。

表 5 多元非线性回归模型迭代历程

Tab. 5 Iteration history of multivariate nonlinear regression model

迭代次数	残差平方和	ε	α_1	α_2	β_1	β_2	γ_1	γ_2
0.1	18 688 496 583 346.190	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1.1	4 051 795 406.509	1.000	0.998	-0.020	1.000	0.983	0.998	0.990
2.1	53 745 812.526	1.000	0.973	4.179E-5	0.987	-0.065	0.950	0.698
3.1	44 599 631.249	1.000	0.972	-6.501E-5	0.986	-0.074	0.954	0.724
4.1	37 404 862.809	0.991	-0.686	0.003	0.751	-0.035	0.907	0.737
5.1	21 316 207.663	0.988	-0.758	0.003	0.690	-0.032	-0.371	0.950
.....								
40.1	1.175	1.255	-2.910E-3	2.681E-6	-6.620E-3	1.160E-4	-1.122E-3	0.830
41.1	1.161	1.267	-2.905E-3	2.774E-6	-6.167E-3	1.160E-4	-1.209E-3	0.815
42.2	1.146	1.269	-2.905E-3	2.753E-6	-6.167E-3	1.160E-4	-1.479E-3	0.801
43.1	1.141	1.270	-2.904E-3	2.737E-6	-6.167E-3	1.160E-4	-1.707E-3	0.787
44.2	1.126	1.274	-2.904E-3	2.741E-6	-6.167E-3	1.160E-4	-2.019E-3	0.766
45.1	1.114	1.276	-2.904E-3	2.738E-6	-6.167E-3	1.160E-4	-2.173E-3	0.761
46.1	1.114	1.276	-2.904E-3	2.738E-6	-6.167E-3	1.160E-4	-2.180E-3	0.761
47.1	1.114	1.276	-2.904E-3	2.738E-6	-6.167E-3	1.160E-4	-2.180E-3	0.761
48.1	1.114	1.276	-2.904E-3	2.738E-6	-6.167E-3	1.160E-4	-2.180E-3	0.761

注: 主迭代数在小数左侧显示, 次迭代数在小数右侧显示。

表 6 参数估计值及 T 检验结果

Tab. 6 Parameter estimation values and T -test result

参数	估计值	标准误差	95% 置信区间	T 值
ε	1.276	0.034	[1.210, 1.341]	37.529
α_1	-2.904E-3	0.000	[-0.003, -0.003]	∞
α_2	2.738E-6	0.000	[2.422E-6, 3.054E-6]	∞
β_1	-6.167E-3	0.001	[-0.008, -0.005]	7.520
β_2	1.160E-4	0.000	[0.000, 0.000]	∞
γ_1	-2.180E-3	0.001	[-0.005, 0.000]	2.121
γ_2	0.761	0.081	[0.602, 0.920]	9.395

根据迭代结果, 建立圆曲线线形指标及初速度与载重柴油汽车累积碳排放量的多元非线性回归模型, 如式 (7) 所示。经验证, 该回归方程中各参数的显著性水平都小于预设值 0.05, 满足显著性检验要求。

方程判定系数 R^2 等于 0.938, 接近 1, 拟合优度较高。

$$E_c = L \times (-2.904 \times 10^{-3} R + 2.738 \times 10^{-6} R^2 - 6.167 \times 10^{-3} V_0 + 1.160 \times 10^{-4} V_0^2 - 2.180 \times 10^{-3} L^{0.761} + 1.276) \times 10^{-3}, \quad (7)$$

式中, E_c 为小半径圆曲线路段载重柴油车的累积碳排放量; R 为圆曲线半径; V_0 为进入圆曲线路段时车辆的初始速度; L 为圆曲线长度。

3 多元回归模型验证

为了验证本研究建立的碳排放量预测模型是否能真实反映车辆的实际碳排放水平, 这里需要对预测结果的精确度做出检验。为此, 本研究开展了实地测试试验, 将实测数据与模型计算结果进行对比。

3.1 试验方案

考虑到现有的柴油车尾气测试方法对检测仪器的技术水平以及外界环境条件的要求都较为苛刻,本研究选择以更方便测定、且测量精度易于控制的油耗量作为直接观测量,间接获得二氧化碳排放量数据。实地测试若干小半径圆曲线路段载重柴油车的实际油耗量,利用目前国际上广泛使用的、由联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)在《国家温室气体清单指南》中规定的碳排放核算方法(简称 IPCC 碳排放核算方法),将实测油耗量转换成碳排放量。计算方法如式(8)、式(9)所示。

$$CEF = NCV \times PF \times COF \times (44/12) \times \rho, \quad (8)$$
$$E(\text{CO}_2) = EC \times CEF, \quad (9)$$

式中, CEF 为二氧化碳排放系数; NCV 为燃料的平均低位发热量; PF 为燃料潜在碳排放系数; COF 为碳氧化率; $E(\text{CO}_2)$ 为二氧化碳排放量; EC 为燃料消耗量; ρ 为燃料密度。

参考《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2008)和《中国能源统计年鉴 2017》中的数据,上述计算方法中各项参数的取值如表 7 所示。计算得出柴油的二氧化碳排放系数为 2.6,即车辆每消耗 1 L 柴油,就会产生 2.6 kg 二氧化碳。

表 7 我国公路柴油能源相关信息

Tab. 7 Information of diesel used in highways of China				
能源类别	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$)	平均低位发热量/ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	潜在碳排放系数/ ($\text{t} - \text{C} \cdot \text{TJ}^{-1}$)	碳氧化率/%
柴油	0.84	42 652	20.17	98

注:表中所列燃油密度为本研究对象车型所使用的燃料对应的密度。

以陕西省省道 107、省道 108 为主要试验道路,选择半径小于等于 550 m 的圆曲线路段作为试验路段。研究表明,小于等于 2% 的道路纵坡对车辆油耗及碳排放水平的影响较小^[12]。因此,要求试验路段的纵坡不超过 2%,且未设置竖曲线,从而避免纵断面线形条件对试验结果产生干扰。根据对试验道路的车辆分布情况调查结果,综合考虑我国车型现状及未来发展趋势,以一汽解放悍威某重型载货汽车作为试验车辆。采用由上海某汽车设计开发有限公司研发的测量精度为 0.000 1L、测量误差小于 0.5% 的 JDSZ-EP-1-1D 型柴油油耗仪获取车辆累积油耗数据,采用全站仪获取路段的线形参数。选择驾驶经验丰富、无不良驾驶习惯的驾驶员驾驶试验车辆行驶于试验路段。要求试验期间天气状况良好,路段内无车祸、紧急停车等突发状况发生,交通流呈自由流状态。

3.2 模型验证

通过现场试验获取了 20 组圆曲线半径、圆曲线长度、初速度组合条件下的车辆油耗数据,并按照式(8)、式(9)转换为碳排放量,列于表 8 中。对比对应条件下采用式(7)计算出的累积碳排放量预测值,验证模型的预测精度。

表 8 碳排放量预测模型精度验证

Tab. 8 Accuracy verification of carbon emission prediction model						
R/m	$V_0/$ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	L/m	实测油耗/L	IPCC 碳排放量 核算值/kg	碳排放量预 测值/kg	相对误差/%
175.0	36.4	208.0	0.055	0.143	0.136	4.84
175.0	38.1	208.0	0.057	0.148	0.137	7.59
200.0	44.7	312.2	0.067	0.174	0.184	5.45
257.5	58.9	350.0	0.082	0.213	0.196	7.93
285.0	60.7	423.5	0.086	0.224	0.214	4.11
302.4	45.3	185.2	0.039	0.101	0.091	10.33
310.9	62.9	314.6	0.061	0.159	0.168	5.93
335.0	58.8	702.5	0.085	0.221	0.231	4.63
335.0	65.7	702.5	0.108	0.281	0.271	3.37
376.4	42.1	476.0	0.047	0.122	0.133	8.70
401.4	78.9	503.4	0.109	0.283	0.271	4.13
423.0	75.5	156.7	0.041	0.106	0.099	6.71
425.1	72.3	550.0	0.096	0.250	0.237	4.94
425.1	50.5	550.0	0.050	0.130	0.140	8.01
460.3	74.0	515.8	0.083	0.216	0.230	6.49
478.6	81.2	500.3	0.097	0.252	0.265	5.23
480.9	40.6	696.7	0.041	0.107	0.095	11.25
523.4	59.2	459.0	0.055	0.144	0.145	0.82
550.0	72.3	702.8	0.097	0.252	0.244	3.10
550.0	80.8	702.8	0.113	0.294	0.314	6.75

经计算,预测值与实测值相对误差平均值为 6.02%,小于 10%,可以认为模型具有较高的预测精度。

4 结论

(1) 本研究以地理、天气、车辆、燃油等信息调查与对比为基础,对 MOVES 模型中的一部分参数进行了本地化修正及设置,使之能够适用于我国的实际道路交通条件与车辆条件。

(2) 利用经过本地化设置的 MOVES 模型建立了载重柴油车在半径小于等于 550 m 的圆曲线路段的碳排放量数据库,在此基础上提出了以圆曲线半径、圆曲线长度、车辆驶入圆曲线路段的初速度这 3 个参数为自变量的多元非线性碳排放量预测模型。

(3) 本研究的碳排放预测模型是针对车身长度大于等于 6 000 mm 且总质量大于 12 000 kg 的重型载重柴油车建立的,是否适用于其他类型的载重汽车还有待于进一步验证。

参考文献:

References:

- [1] 李玲. 中国交通各部门 CO₂ 排放差异和影响因素研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
LI Ling. Study on CO₂ Emission Differences among Chinese Transport Sectors and Their Influencing Factors [D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [2] GREEN F, STERN N. China's Changing Economy: Implications for Its Carbon Dioxide Emissions [J]. Climate Policy, 2017, 17 (4): 423–442.
- [3] 袁长伟, 张倩, 芮晓丽, 等. 中国交通运输碳排放时空演变及差异分析 [J]. 环境科学学报, 2016, 36 (12): 4555–4562.
YUAN Chang-wei, ZHANG Qian, RUI Xiao-li, et al. Spatiotemporal Evolution and Difference of Transport Carbon Emissions in China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36 (12): 4555–4562.
- [4] 李昊, 虞明远, 余艳春, 等. 基于车辆排放水平的差异化公路通行费率的分析 [J]. 公路交通科技, 2018, 35 (6): 137–144.
LI Hao, YU Ming-yuan, YU Yan-chun, et al. Analysis on Differentiated Highway Toll Rate Based on Vehicle Emission Level [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35 (6): 137–144.
- [5] 彭美春, 朱兵禄, 胡红斐, 等. 重型货运车辆碳排放特性研究 [J]. 安全与环境学报, 2016, 16 (1): 269–272.
PENG Mei-chun, ZHU Bing-lu, HU Hong-fei, et al. Study on the Carbon Emission Characteristics of the Heavy Duty Freight Trucks [J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16 (1): 269–272.
- [6] FRANCO V, KOUSOULIDOU M, MUNTEAN M, et al. Road Vehicle Emission Factors Development: A Review [J]. Atmospheric Environment, 2013, 70 (70): 84–97.
- [7] 张广昕, 孙晋伟, 张传桢, 等. 机动车污染物排放影响因素及控制措施研究 [J]. 交通节能与环保, 2013, 9 (2): 51–55.
ZHANG Guang-xin, SUN Jin-wei, ZHANG Chuan-zhen, et al. Research on Motor Vehicle Emission Factors and Control Measures [J]. Energy Conservation & Environmental Protection in Transportation, 2013, 9 (2): 51–55.
- [8] 贾洪飞, 隗志才, 张泉雄, 等. 高速公路后评价油耗指标的确定与对比 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2004, 34 (2): 298–301.
JIA Hong-fei, JUAN Zhi-cai, ZHANG Xiao-xiong, et al. Determination and Comparison of Fuel Consumption for Expressway Post-assessment [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2004, 34 (2): 298–301.
- [9] 章后忠, 潘玉利, 程珊珊, 等. 建立四类代表车型的理論油耗模型 [J]. 华东公路, 2002 (6): 63–66.
ZHANG Hou-zhong, PAN Yu-li, CHENG Shan-shan, et al. Theoretical Fuel Consumption Models for Four Types of Vehicle [J]. East China Highway, 2002 (6): 63–66.
- [10] 彭勃. 高速公路汽车油耗模型研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
PENG Bo. Research about Model of Vehicle's Fuel Consumption on Expressway [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [11] 刘真. 道路线形指标对车辆尾气排放及燃油经济的影响研究 [D]. 南京: 东南大学, 2017.
LIU Zhen. Influence of Road Alignment Index on Vehicle Pollution and Fuel Consumption [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [12] 孙文圃, 许金良, 景立竹, 等. 基于 MOVES 的高速公路纵坡段载重柴油车辆碳排放预测模型的研究 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (12): 144–150.
SUN Wen-pu, XU Jin-liang, JING Li-zhu, et al. Study on Carbon Emission Prediction Model of Heavy-duty Diesel Vehicle in Expressway Longitudinal Slope Sections Based on MOVES [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32 (12): 144–150.
- [13] KO M, LORD D, ZIETSMAN J. Environmentally Conscious Highway Design for Vertical Grades [J]. Transportation Research Record, 2013, 2341: 53–65.
- [14] JIAO S, HOU C, LI Y, et al. Establishing the CO₂ Emission Model of Carbon Neutral Road Based on Gradient [C] // International Conference on Electrical and Control Engineering. Yichang: IEEE, 2011: 4494–4497.
- [15] ABOU-SENNA H, RADWAN E, WESTERLUND K, et al. Using a Traffic Simulation Model (VISSIM) with an Emissions Model (MOVES) to Predict Emissions from Vehicles on a Limited-access Highway [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2013, 63 (7): 819–831.

- LÜ Feng. Research on the Identification Coefficient of Relational Grade for Grey System [J]. System Engineering – Theory and Practice, 1997, 17 (6): 49 – 54.
- [14] 范凯, 吴皓莹. 灰色系统关联度中一种新的分辨系数确定方法 [J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24 (7): 87 – 89.
- FAN Kai, WU Hao-ying. A New Method on Identification Coefficient of Relational Grade for Gray System [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2002, 24 (7): 87 – 89.
- [15] 陈静, 程东祥, 诸大建. 基于灰理想关联分析的中国城市低碳竞争力评价 [J]. 资源科学, 2012, 34 (9): 1726 – 1733.
- CHEN Jing, CHENG Dong-xiang, ZHU Da-jian. Evaluation of Urban Low-carbon Competitiveness in China Using Grey Relational Analysis [J]. Resource Science, 2012, 34 (9): 1726 – 1733.
- [16] 李伟, 王超, 周绍松, 等. 最优分辨系数和主成分分析在烤烟品种综合评价中的应用 [J]. 中国烟草科学, 2017, 38 (2): 45 – 50.
- LI Wei, WANG Chao, ZHOU Shao-song, et al. Application of Optimal Resolution Coefficient and Principal Component Analysis in Comprehensive Evaluation of Flue-cured Tobacco Varieties [J]. Chinese Tobacco Science, 2017, 38 (2): 45 – 50.
- [17] 郑华伟, 夏梦蕾, 张锐, 等. 基于熵值法和灰色预测模型的耕地生态安全诊断 [J]. 水土保持通报, 2016, 36 (3): 284 – 289, 296.
- ZHENG Hua-wei, XIA Meng-lei, ZHANG Rui, et al. Diagnosis on Ecological Security of Cultivated Land Based on Entropy Method and Grey Prediction Model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation 2016, 36 (3): 284 – 289, 296.
- [18] 董彦非, 吴欣蓬, 屈高敏. 战斗机综合作战效能评估的改进灰色关联模型 [J]. 飞行力学, 2017, 35 (2): 92 – 96.
- DONG Yan-fei, WU xin-peng, QU Gao-min. The Improved Grey Relation Model for Combined Operational Effectiveness Evaluation of Fighters [J]. Flight Dynamics, 2017, 35 (2): 92 – 96.
- [19] 杜强, 陈乔, 杨锐. 基于 Logistic 模型的中国各省碳排放预测 [J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22 (2): 143 – 151.
- DU Qiang, CHEN Qiao, YANG Rui. Forecast Carbon Emissions of Provinces in China Based on Logistic Model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22 (2): 143 – 151.
-
- (上接第 131 页)
- [16] HUISINGH D, ZHANG Z, MOORE J C, et al. Recent Advances in Carbon Emissions Reduction: Policies, Technologies, Monitoring, Assessment and Modeling [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 103: 1 – 12.
- [17] LUQUE R, CASTRO M. Highway Geometric Design Consistency: Speed Models and Local or Global Assessment [J]. International Journal of Civil Engineering, 2016, 14 (6): 1 – 9.
- [18] NAVIN F. Some Factors in the Design of Rural Highway Curves [C] // 94th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington D. C.: Transportation Research Board, 2015: 1 – 14.
- [19] 张志清, 李晨, 贺成林. 双车道公路小半径曲线段行车速度与行车轨迹关系研究 [J]. 道路交通与安全, 2016, 16 (5): 22 – 26.
- ZHANG Zhi-qing, LI Chen, HE Cheng-lin. Research on the Relationships Between Driving Speed and Driving Track Path on Small Radius Curves of Two-lane Highways [J]. Road Traffic and Safety, 2016, 16 (5): 22 – 26.
- [20] 徐龙, 于雷, 虞明远, 等. 美国移动源排放测算机制与方法 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (8): 154 – 158.
- XU Long, YU Lei, YU Ming-yuan, et al. Estimation Mechanism and Methodology of Mobile Source Emission in America [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (8): 154 – 158.
- [21] PARK S, AHN K, PAKHA H A, et al. Real-time Emissions Modeling with Environmental Protection Agency MOVES: Framework Development and Preliminary Investigation [J]. Transportation Research Record, 2015, 2503: 60 – 69.
- [22] VALLAMSUNDAR S, LIN J. MOVES versus MOBILE: Comparison of Greenhouse Gas and Criterion Pollutant Emissions [J]. Transportation Research Record, 2011, 2233: 27 – 35.
- [23] FITZPATRIK K, COLLINS J M. Speed-profile Model for Two-lane Rural Highways [J]. Transportation Research Record, 2000, 1737: 42 – 49.