

文章编号:0451-0712(2021)03-0328-09

中图分类号:X73

文献标识码:

基于 MOVES 的上坡路段 载重车碳排放规律研究

孙振华^{1,2}, 许金良¹, 徐贵龙¹, 董亚萍¹

(1. 长安大学公路学院 西安市 710064; 2. 绍兴市交通投资集团有限公司 绍兴市 312000)

摘要: 二氧化碳是造成温室效应的主要气体,上坡路段显著影响载重货车的碳排放。为研究上坡路段对载重车碳排放的影响特性,基于汽车动力学模型,通过计算重量功率比为 148 kg/kW 的载重车在不同坡度路段上坡行驶过程中的瞬时速度,作为 MOVES 模型的基础数据,预测得到 10~90 km/h 共 9 档初速度和 0~8% 共 9 个纵坡组合条件下的碳排放量数据,采用 SPSS 分析了坡度和初速度对碳排放量的影响,建立了以坡度和初速度为自变量的载重车碳排放模型,利用该模型得到了碳排放量等高线图。结果表明:载重车上坡过程中碳排放量随坡度的增加而增大,随初速度的增加而减小;载重车爬坡初速度越大,碳排放量对坡度的敏感性越低,低坡度条件下碳排放量对初速度的敏感性比陡坡更低;环保型的公路纵坡设计建议采用高坡度和短坡长组合。研究成果可以直观地分析纵坡和初速度对载重车碳排放的影响,指导环保型道路建设。

关键词: 碳排放; 温室效应; 上坡; 动力学模型; 碳排放模型; 等高线图; 敏感性; 环保

随着世界经济的快速发展,公路的里程和汽车拥有数量也在快速的增加,导致机动车在行驶过程中排放的污染物大量增加。全球范围内交通运输行业的碳排放量占整个工业碳排放量的 27%^[1],公路货运在交通运输中产生的碳排放比例日益增加^[2],在陕西,货运碳排放的比例达到了 39.9%^[3]。路线几何设计指标对货车碳排放有显著影响^[4,5],尤其在爬坡路段,货车需要额外克服重力做功,消耗更多燃料,碳排放量比平坡和下坡大^[6,7]。研究道路碳排放规律有很大的价值和意义。

目前很多学者研究了纵坡对汽车碳排放的影响。Kanok Boriboonsomsin 等^[6]利用导航系统记录行驶过程中的位置和速度,研究了道路纵坡对轻型轿车的碳排放影响;Emrah Demir 等^[8]分析了 6 种货车的微观排放模型并进行实地试验,比较了不同模型的纵坡坡度影响程度;Yaping Dong 等^[3]基于汽车动力学模型和功能转换关系,从理论推导出货车以恒定速度在上坡路段行驶时的碳排放,并通过实地试验进行模型验证;Jinliang Xu 等^[7]从能量转换的角度出发,结合热力学第一定律预测了小汽

车以恒定速度在公路上行驶时产生的碳排放量,提出平衡坡度的概念指导道路的纵坡设计。

Myunghoon Ko 等^[9]将汽车动力学模型^[10]和 MOVES 结合,分别得到了小轿车和货车在 10 个坡度的纵坡和 11 个初速度条件下爬坡产生的各类污染物的数量,分析了在汽车速度降低 20 km/h 和 10 m/h 时的污染物排量差异,以速度降低小于 20 km/h 为条件给出了推荐的纵坡长度,并从道路的全寿命周期分析了在道路设计中减少汽车燃油消耗的经济性。然而对于货车爬坡的碳排放还有很多可以改进的地方:首先,文献^[9]仅得到了有限的货车碳排放数据,如何量化货车以任意初速度爬坡产生的碳排放还有待研究;其次,纵坡坡度和货车初速度综合影响货车碳排放,两者的综合影响程度未进行探讨;最后,考虑中国《公路路线设计规范》^[11](以下简称规范)规定了货车的最低爬坡速度,如何利用货车爬坡的碳排放规律指导道路的环保性设计是一个还未解决的问题。

规范^[11]中没有将汽车碳排放作为设计过程中考虑的指标,量化上坡路段对货车碳排放的影响可

以为道路设计提供参考。本文基于货车的重量功率比,以动力学模型为基础,建立不同纵坡坡度条件下,汽车以不同初速度爬坡的速度变化数据;将该速度和加速度数据导入 MOVES 模型,仿真出货车在坡度为 0~8% 共 9 档坡度,初速度为 10~90 km/h 共 9 档初速度的组合情况下二氧化碳的排放情况,通过二元方差分析研究坡度和初速度对碳排量的影响;用一元回归模型建立坡度和碳排量、初速度的关系,建立碳排量关于初速度和坡度的偏微分方程,利用仿真数据对模型进行拟合;通过 MOVES 仿真初速度为 55 km/h 的碳排放数据对模型进行验证,并分析了货车的碳排放与坡度和初速度变化的规律;利用 k-means 聚类分析了货车碳排放对坡度和初速度的敏感性,分析了规范^[11]中的纵坡设计指标的环保性。

文章共分 7 个部分进行阐述:第 1 部分分析了货车爬坡过程中的汽车动力学模型以及各类动力学参数取值;第 2 部分求解不同坡度和初速度组合条件下货车爬坡的速度数据;第 3 部分利用 MOVES 仿真出不同坡度和初速度组合条件下货车的碳排量数据;第 4 部分建立了货车爬坡的碳排放模型;第 5 部分对模型进行验证,并结合规范^[11]分析了货车爬坡的碳排放规律;第 6 部分讨论了文章的研究结论和未来的研究方向;第 7 部分总结出文章的 3 个重要结论。

1 汽车动力学模型

为了精确地计算货车爬坡时的速度和加速度变化,Changjen Lan 等^[10]分析了货车在爬坡过程中的受力情况,推导出速度和加速度之间的关系,然后根据运动学微分方程对速度和加速度进行求解。

$$F_t - F_a - F_r - F_g = M_e a \quad (1)$$

式中: F_t 为牵引力,当发动机运转为货车提供动力的时候,汽车的传动装置会消耗一部分的能量,导致发动机的功率不能完全转换为牵引力功率; F_a 为空气阻力; F_r 为滚动阻力; F_g 为货车的重力分力; M_e 为货车的有效质量。计算见公式(2):

$$\begin{cases} F_t = \frac{1\,000rP}{v} \\ F_a = \frac{\rho}{2} C_a A v^2 \\ F_r = \frac{C_r (c_1 + c_2 v) W}{1\,000} \\ F_g = W \sin G \approx WG = Mg \end{cases} \quad (2)$$

式中: r 为发动机传动效率,取 $r=0.85$; P 为发动机的功率, kW; v 为货车的速度, m/s; ρ 为空气密度, kg/m^3 , 取 $\rho=1.225\,6\text{ kg/m}^3$; C_a 为空气阻力系数, 取 $C_a=0.8$; A 为货车迎风面积, m^2 , 取 $A=0.9 \times \text{轮宽} \times \text{车高} = 0.9 \times 2.4 \times 3.5 = 7.56\text{ m}^2$; C_r 为滚动系数,取值和路面类型有关^[12],沥青路面采用 $C_r=1.5$; c_1 和 c_2 为滚动阻力系数,对于目前中国卡车采用的子午线轮胎,分别采用 $c_1=4.575$ 、 $c_2=0.032\,8$ ^[12]; W 为货车重力, N; G 为爬坡车道坡度。

通过对以上模型求解,求得货车爬坡过程中的加速度和速度的关系见公式(3):

$$a = \frac{M}{M_e} \left[\frac{101.97r/v}{W/P} - \frac{\frac{\rho}{2} C_a A v}{W} - C_r \cdot (c_1 + c_2 v) W / 1\,000 - G \right] g \quad (3)$$

式中: M 为货车的静态质量, kg; M_e 为货车的有效质量,当货车在行驶过程中,车轮和发动机存在转动惯量,该转动惯量会使汽车比静态时多出一部分质量,此时的货车质量为 M_e ^[13-15]。

不同车型的静态质量/有效质量(M/M_e)是不相同的,比值随着汽车发动机的类型和齿轮数量改变,但是当汽车速度超过 25 km/h 时,不同车型的比值误差在 5% 以内,因此对不同的车型采用统一的模型,用简化的线性模型式(4)表示^[15]。运动学微分方程见公式(5),根据公式(5)可计算出货车在爬坡过程中的速度和加速度。

$$\frac{M}{M_e} = \begin{cases} 0.2 & v \leq 1.8\text{ m/s} \\ 1.02 - 1.45/v & v > 1.8\text{ m/s} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} a = \frac{dv}{dt} \\ v = \frac{ds}{dt} = \frac{ds}{dv} \frac{dv}{dt} = a \frac{ds}{dv} \end{cases} \quad (5)$$

2 动力学模型求解

为探究不同初速度和不同坡度条件货车在爬坡路段的碳排放规律,笔者考虑中国的货车未来的发展和普遍存在的超载情况,采用的参考车型为欧曼六轴载重 50 t 的货车(BJ4253SMFJB-S7),功率 $P=330\text{ kW}$,质量 $W=49\,000\text{ kg}$,重量功率比 $W/P=148\text{ kg/kW}$ 。

以上述模型为基础,在假定坡长为 800 m 的情况下,对货车爬坡过程的速度和加速度进行求解,得到货车在坡度为 0~8%,初速度为 10~90 km/h 的速度变化数据(图 1 展示了初速度为 10/90 km/h

时,在不同坡度情况下的速度变化情况)。

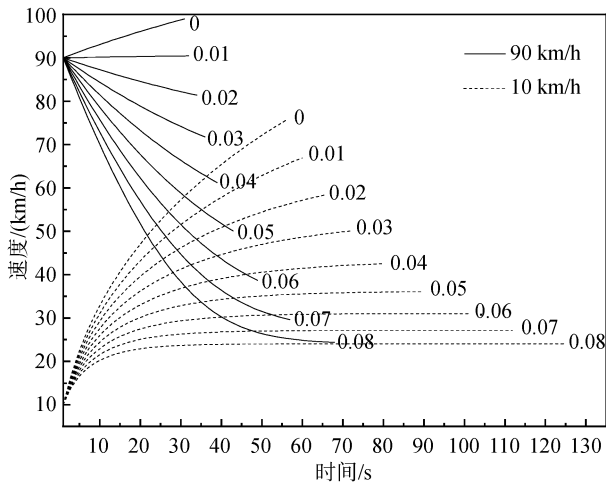


图1 初速度10/90 km/h速度变化图示

3 MOVES 微观碳排放仿真

Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES) 是由美国环保署设计的移动排放源污染物排放仿真模型,本文利用 MOVES 的微观模型对货车的纵坡碳排放进行仿真。

3.1 仿真计算原理

将动力学模型得到的每秒的速度数据导入运行周期参数,MOVES 通过将速度数据转换货车运行状态对应的运行工况,每一个工况对应不同的排放过程,然后把所有的工况排放过程累积起来计算出整个行驶过程的碳排放量。计算见公式(6):

$$TE_{process, sourcetype} = \left(\sum ER_{process, bin} \times Ac_{bin} \right) \times Aj_{process} \quad (6)$$

式中: TE 为总排放量; $process$ 为排放过程; $sourcetype$ 为排放源类型; bin 为车辆运行工况; ER 为排放速率; Ac 为行驶特征; Aj 为调整因子。

3.2 模型参数输入

MOVES 提供了美国 50 个州约 3 000 个地区的模拟地理信息,文献[16]比对陕西省和美国各州的海拔、气候、平均气温等地理信息后得出美国密歇根州的地理条件和陕西省的类似,因此本文采用的模拟地区是密歇根州。我国国六标准从 2019 年开始逐步实施^[17],国六标准接近美国的 Tier 3 标准 2020 年的车队平均水平,因此本文采用模拟年份为 2020 年。

不同交通流条件对货车的碳排放有显著影响^[18],为简化道路条件,在假设汽车之间无相互干扰的条件下对货车爬坡产生的碳排放量进行仿真。微观模型中输入的参数包括机动车检测与维护制度覆盖率(I/M)、机动车车龄分布、燃料类型、气候条件、路段属性、路段车辆类型、车辆瞬时(平均)速度/运行工况等数据。

(1)车辆速度数据:由汽车动力学模型求解出货车的爬坡速度数据。

(2)路段属性:乡村非限制道路,路段长度 800 m,坡度从 0~8%。

(3)燃料类型:因此次使用的是柴油,对应 fuel Type ID 为 2,燃料参数见表 1。

(4)路段车辆类型:采用的是长组合货车,对应 Source Type ID 为 62。

(5)气候条件:温度为 25℃,湿度为 50%。

(6)机动车年龄分布:本次仿真采用的机动车车龄为 3 年。

(7)机动车检测与维护制度覆盖率(I/M):黄冠涛^[19]研究了不同 I/M 制度覆盖率对不同污染物排放的影响,发现 I/M 的覆盖率对二氧化碳的排放影响较小。因此本文在对碳排放进行模拟时,采用的是无 I/M 制度。

表 1 燃料参数

燃料类型代号	燃料类型	子类型代号	子类型	石油比例	化石比例	碳含量/%	氧化比例	湿度修正系数/%	内能/kJ/g	密度/g/gallons
2	柴油	20	传统柴油	1	1	2.019	1	0.26	43.717	3 167
2	柴油	21	生物柴油	0.81	0.81	2.009	1	0.26	43.061	3 167
2	柴油	22	费拖柴油	0	1	2.069 5	1	0.26	43.247	3 167

MOVES 针对微观模型仿真输入的行驶参数分为 3 类:①路段运行工况数据;②路段平均速度数据;③路段的瞬时速度数据。MOVES 将输入的数据

转换为运行工况数据进行仿真计算。针对本文采用的瞬时速度数据,MOVES 先利用瞬时速度求出货车的比功率,再由比功率和瞬时速度确定运行工

况,比功率 STP 的计算见公式(7)。

$$STP = \frac{Av + Bv^2 + Cv^3 + M \cdot v \cdot (a + g \cdot \sin\theta)}{f_{scale}} \quad (7)$$

式中: A 为滚动阻力系数, $\text{kW} \cdot \text{m/s}$; B 为转动阻力系数, $\text{kW} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$; C 为空气阻力系数, $\text{kW} \cdot \text{m}^3/\text{s}^3$; M 为车辆重量, 英吨; v 为瞬时速度, m/s ; a 为瞬时加速度, m/s^2 ; g 为重力加速度, 9.8m/s^2 ; θ 为道路坡度; f_{scale} 为修正质量系数。对于 MOVES 中代号为 62 的组合货车, 各参数取值见表 2。

表 2 货车比功率参数

$\frac{A}{\text{kW} \cdot \text{m/s}}$	$\frac{B}{\text{kW} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2}$	$\frac{C}{\text{kW} \cdot \text{m}^3/\text{s}^3}$	$\frac{M}{\text{metric ton}}$	f_{scale}
1.630 4	0	0.004 2	24.601	17.1

4 货车碳排放模型

为建立货车碳排放模型, 对坡度和初速度进行

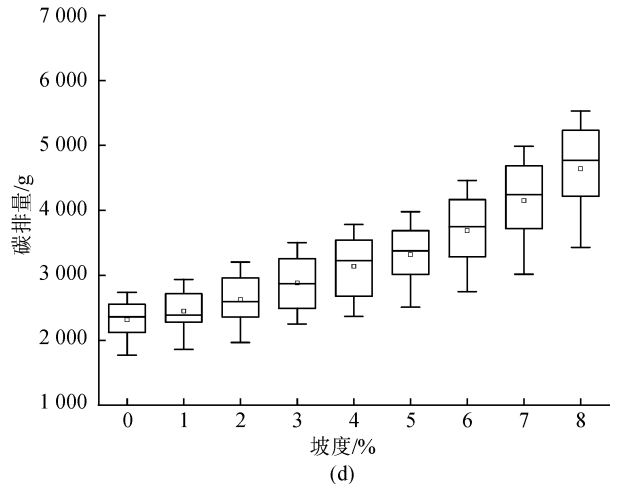
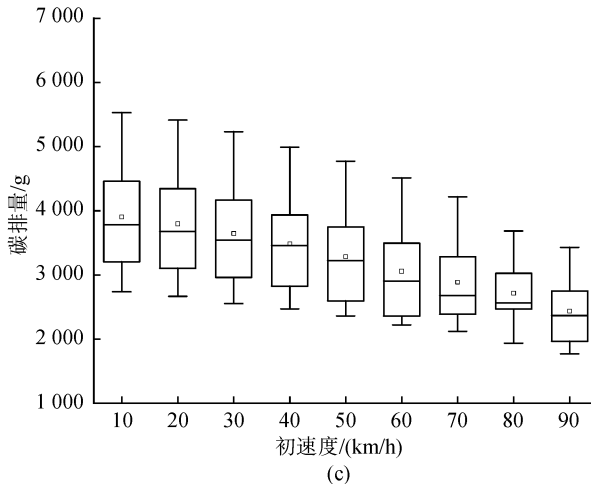
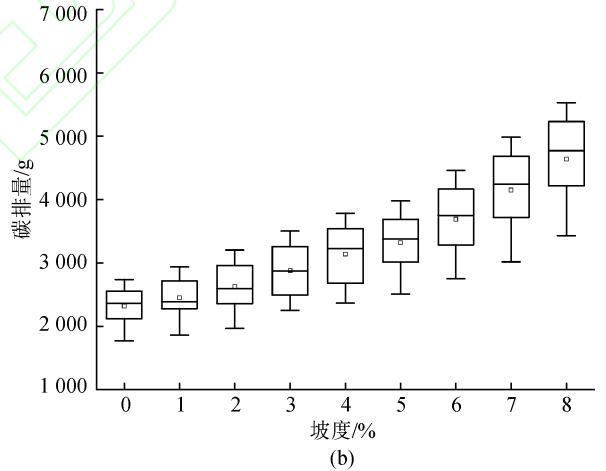
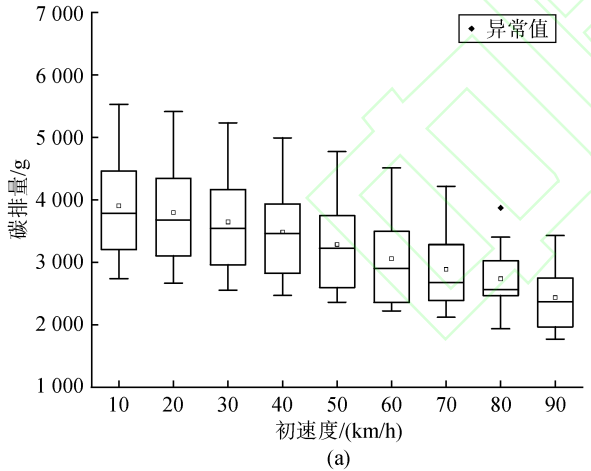


图 2 箱线图

二元方差分析, 分别建立坡度、初速度和货车碳排放量的一元回归关系模型, 以坡度和初速度为自变量, 建立货车碳排放量和坡度、初速度的偏微分方程组, 求解偏微分方程组得到货车的碳排放模型, 利用仿真得到的碳排放数据对模型进行拟合, 最后用 MOVES 重新模拟碳排放数据对模型进行检验。

4.1 异常数据检测与处理

MOVES 模型计算出货车在纵坡为 $0 \sim 8\%$, 初速度为 $10 \sim 90 \text{ km/h}$ 时的碳排放数据。利用箱线图对数据进行检测, 检测结果见图 2。异常值检测的原理见公式(8):

$$Q_{\max} = Q_3 + k(Q_3 - Q_1) \quad (8)$$

式中: Q_{\max} 为上限值; Q_3 为 75% 分位数; Q_1 为 25% 分位数; k 为系数, 取 $k = 1.5$ 。在初速度为 80 km/h 时, 异常值超过了 Q_{\max} , 处理方法采用线性差值法替代异常数据, 处理完成后的箱线图见图 2(c) 和图 2(d), 从图 2(c) 和图 2(d) 可看出, 处理完成的数据已无异常值。

4.2 坡度和初速度显著性检验

为探究坡度和初速度对货车爬坡时碳排量影响,对碳排量的两个影响因素进行二元方差分析。见表3,坡度和初速度的显著性 Sig 接近 0,说明坡度和初速度对货车碳排量的影响显著^[3,7]。

表3 二元方差分析

因素	df	F	Sig.
坡度/%	8	215.583	0.000
初速度/(km/h)	8	88.701	0.000

4.3 一元回归模型

(1)坡度和货车碳排量的回归模型建立。

以纵坡为自变量,货车碳排量为因变量,通过SPSS建立二次函数回归模型 $E = aI^2 + bI + c$,拟合曲线图见图3,拟合模型参数见表4,不同初速度

下可决系数 R^2 均在 0.9 以上,拟合优度较好。

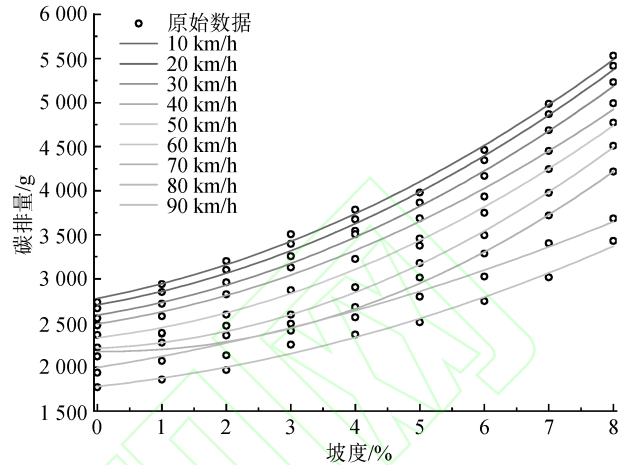


图3 坡度~碳排量拟合曲线图示

表4 坡度~碳排量拟合参数

系数	以下初速度(km/h)各参数值								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
a	24.609	25.724	25.803	23.861	26.707	31.551	33.604	11.313	14.929
b	141.695	127.539	117.923	113.219	87.034	32.624	-13.963	116.326	79.416
c	2 778.999	2 705.020	2 588.989	2 489.362	2 332.970	2 212.403	2 179.500	1 994.127	1 779.739
R^2	0.996	0.996	0.994	0.984	0.995	0.998	0.984	0.976	0.991

(2)初速度和货车碳排量的回归模型建立。

以初速度为自变量,货车碳排量为因变量,通过SPSS建立二次回归模型 $E = a_1V^2 + b_1V + c_1$,拟合曲线图见图4,拟合模型参数见表5,不同初速度下可决系数 R^2 均在 0.9 以上,拟合优度较好。

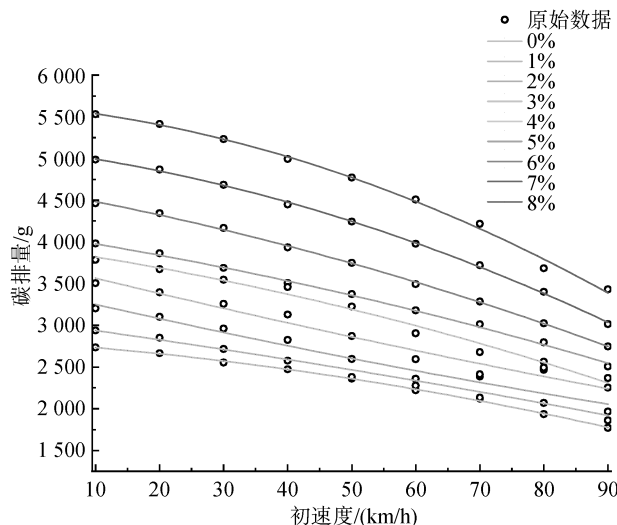


图4 初速度~碳排量拟合曲线图示

4.4 偏微分方程模型

由4.3节可知,道路纵坡坡度和货车爬坡初速度对货车碳排量的影响显著。采用坡度货车碳排量进行拟合时,拟合方程受初速度的影响,采用初速度对货车碳排量进行拟合时,不同坡度条件下拟合方程差别较大。为了得到统一的货车碳排量模型,建立货车碳排量关于坡度和初速度的偏微分方程,见公式(9)。

$$\begin{cases} \frac{\partial E(V, I)}{\partial V} = k_0 V + k_1 + f(I) \\ \frac{\partial E(V, I)}{\partial I} = k_2 I + k_3 + g(V) \end{cases} \quad (9)$$

式中: E 为货车碳排量 g ; V 为货车爬坡初速度, km/h ; I 为爬坡坡度, $\%$; $k_0 \sim k_3$ 为模型参数, $f(I)$ 和 $g(V)$ 分别为爬坡坡度 I 和爬坡初速度 V 的函数。

求解式(9)的偏微分方程得货车碳排量模型 E :

$$E = \frac{1}{2} k_0 V^2 + k_1 V + \frac{1}{2} k_2 I^2 + k_3 I + k_4 VI + k_5 \quad (10)$$

表 5 初速度~碳排放量拟合参数

系数	以下坡度(%)各参数值								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
a_1	-0.066	-0.023	0.032	0.026	-0.080	-0.062	-0.080	-0.145	-0.194
b_1	-5.403	-10.389	-18.123	-19.176	-10.925	-11.691	-13.677	-9.924	-7.479
c_1	2 793.819	3 043.777	3 429.681	3 755.543	3 937.763	4 098.882	4 628.384	5 107.102	5 630.145
R^2	0.998	0.952	0.904	0.968	0.980	0.995	0.999	0.999	0.996

在置信水平为 95% 的条件下,利用 MATLAB 对货车碳排放量模型进行参数拟合,得到的参数取值见表 6,模型图见图 5,模型的拟合 $R^2=0.989$,说明拟合优度较好。利用 SPSS 对模型进行显著性检验,结果见表 7,模型的显著性检验达到了显著水平。

表 6 货车碳排放量模型参数

模型参数	估计值	95%置信区间
k_0	-0.132	(-0.202, -0.061)
k_1	-4.556	(-8.393, -0.719)
k_2	48.47	(41.39, 55.55)
k_3	180.5	(147.2, 213.7)
k_4	-1.827	(-2.138, -1.517)
K_5	2 776	(2 666, 2 887)

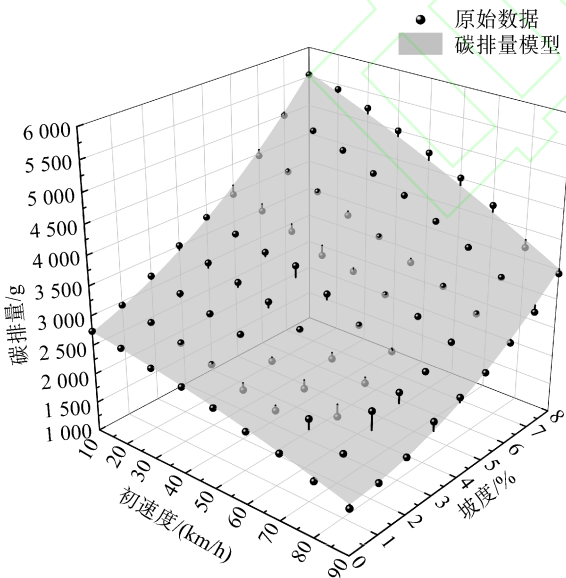


图 5 碳排放与坡度、初速度关系图示

表 7 Anova

模型	项目	平方和	df	均方	F	Sig.
1	回归	64 762 717.79	5	12 952 543.6	1 523.835	0.000
	残差	637 497.391	75	8 499.965 21		
	总计	65 400 215.18	80			

5 货车碳排放模型验证及分析

5.1 模型验证

为验证货车碳排放量模型准确度,本文利用 MOVES 模拟货车以初速度 55 km/h 爬坡,得到货车爬坡产生的碳排放量数据,利用货车碳排放量模型计算得到模型值,见表 8。

表 8 碳排放对比(初速度 55 km/h)

坡度/%	模拟碳排放量/g	模型值/g
0	2 288.24	2 326.526
1	2 278.01	2 430.776
2	2 476.28	2 583.496
3	2 732.68	2 784.686
4	3 067.41	3 034.346
5	3 276.78	3 332.476
6	3 634.72	3 679.076
7	4 106.11	4 074.146
8	4 624.59	4 517.686

利用可决系数 R^2 来评价模拟碳排放量(初速度 50 km/h)和模型值之间的误差,可决系数 R^2 的计算公式见公式(11)。残差正态检验的 Q-Q 图见图 6,给定显著性水平为 0.05,采用 K-S 检验对残差进行正态分布检验,检验结果见表 9。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - f_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (11)$$

式中: y_1, \dots, y_n 共 n 个观测值,对应的模型预测值分别为 f_1, \dots, f_n 。利用式(11)计算得到模拟碳排放量和模型值的可决系数 $R^2=0.998$,说明模型对模拟碳排放量的拟合优度较好。残差 Q-Q 图中的期望值位于直线附近,认为残差接近正态分布, K-S 检验的双尾渐进概率 p 值为 0.848,大于显著性水平 0.05,认为在 95% 的置信水平下,残差分布和正态分布无显著差异。

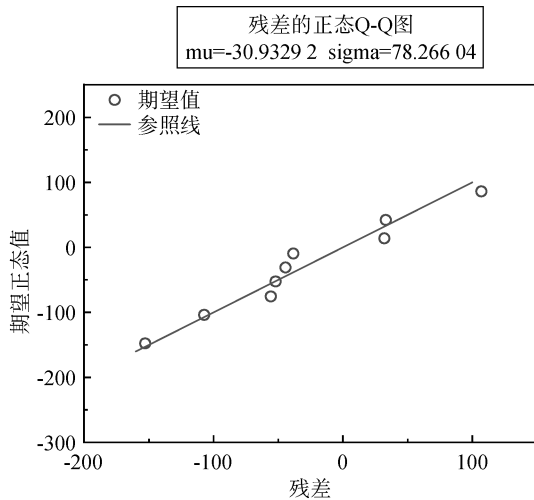


图6 残差正态检验 Q-Q 图

表9 残差 K-S 检验

均值	标准差	Kolmogorov-Smirnov Z	渐近显著性(双侧)
-30.933	78.266	0.612	0.848

5.2 碳排放规律分析

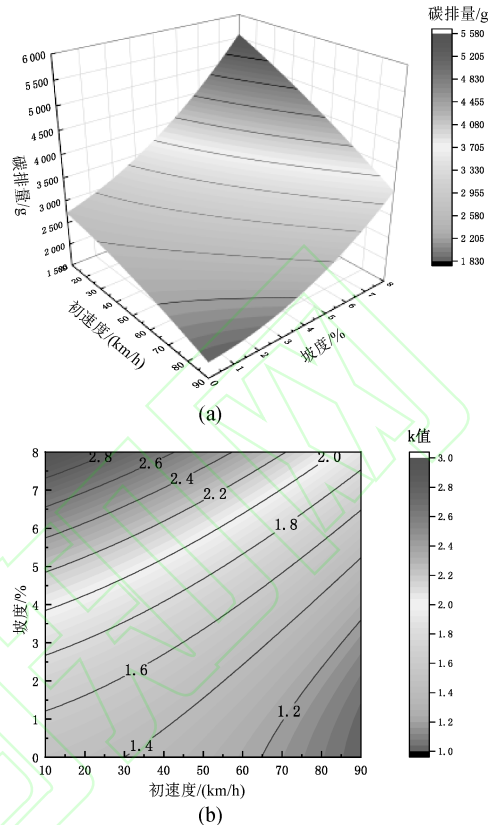
为描述不同坡度和不同初速度的组合条件下,货车碳排放的数量关系,以坡度 $0 \sim 8\%$ 和初速度 $10 \sim 90 \text{ km/h}$ 为边界条件,定义 k 值见公式(12):

$$\left\{ \begin{array}{l} k = \frac{E(V, I)}{\min(E(V, I))} \\ V \in [10, 90], I \in [0, 8] \end{array} \right. \quad (12)$$

式中: k 表示货车碳排放量与最小碳排放的数量关系。绘制货车碳排放的等高线图(图7(a))和 k 值图(图7(b)),图7(b)中, k 值线之间的距离表示1个最低碳排放量单位,线上的数值表示该等高线上的坡度和初速度组合下,货车产生的碳排放量和最低碳排放量之间的数量关系。

从图7可看出,随着初速度增加货车碳排放量降低,随着坡度增加货车碳排放量增加^[3,7]; 10 km/h 初速度和 8% 坡度组合条件下的碳排放量是 90 km/h 初速度和 0 坡度组合产生碳排放量的3倍。货车爬坡初速度越大,等高线越稀疏,表示每增加1单位坡度,碳排放量增加的值越小,说明初速度越大,碳排放量对坡度的敏感性越低;纵坡坡度越小,等高线较稀疏,随着坡度的增加,等高线变密,说明在坡度较低时,碳排放量对初速度的敏感性较低,随着坡度增大,碳排放量对初速度的敏感性增高。

为比较不同初速度条件下货车碳排放量对坡度的敏感性和不同坡度条件下货车碳排放量对初速度的敏感性,定义碳排放量对初速度的敏感性为 S_V , 碳排放量对坡度的敏感性为 S_I , 见公式(13)。

图7 碳排放等高线图和 k 值图示

$$\left\{ \begin{array}{l} S_V(V, I) = \frac{\partial E(V, I)}{\partial V} \\ S_I(V, I) = \frac{\partial E(V, I)}{\partial I} \end{array} \right., V \in [10, 90], I \in [0, 8] \quad (13)$$

本文将敏感性分为高敏感性和低敏感性,为了将敏感性的差别最大化,利用 k -means 聚类法对初速度敏感性 S_V 和坡度敏感性 S_I 进行聚类,类别 k 取2,即对应高敏感性和低敏感性两类。聚类结果见图8,图8(a)为货车碳排放量对坡度的敏感性聚类图,当初速度为 10 km/h 时,货车碳排放量对 2.4% 以上的坡度呈高敏感性,随着初速度增大,高敏感性比例降低。当初速度为 90 km/h 时,货车碳排放量对 5.4% 以上的坡度呈高敏感性。图8(b)为货车碳排放量对初速度的敏感性聚类图,当坡度低于 1.1% 时,碳排放量对初速度呈低敏感性,当坡度大于 1.1% 时,高敏感性比例增加,当坡度高于 6.8% 时,货车碳排放量对初速度呈高敏感性。

5.3 工程分析

规范^[11]基于铰接六轴列车的爬坡能力和条件,规定了高速公路最大设计坡长指标,见表10。同时规定了货车在上坡路段行驶时的最低允许速度,见表11。

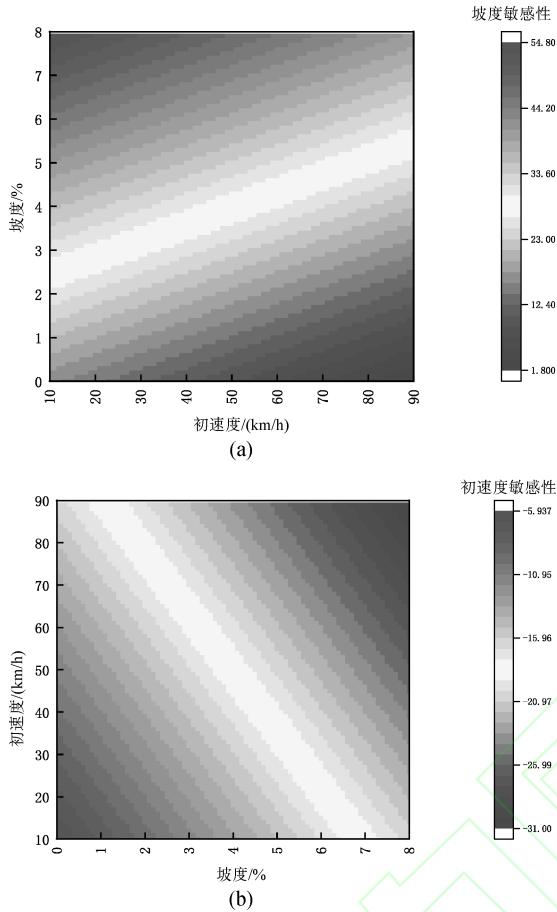


图 8 敏感性聚类图示

表 10 不同纵坡最大坡长 m

设计速度 km/h	纵坡坡度/%						
	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
120	不限	1 000	680	520	420	—	—
100	不限	不限	910	570	440	360	300
80	不限	不限	不限	930	560	410	320

表 11 上坡方向最低允许速度

设计速度/(km/h)	120	100	80
上坡最低允许速度/(km/h)	60	50	40

本文基于研究的碳排放模型和中国路线设计规范的规定,计算出货车在不同坡度的最高碳排量,见表 12。从表 12 得出,同一纵坡条件下,设计速度越高,货车碳排量越低;同一设计速度路段,坡度越大,路段长度越短,最高碳排量越低。

6 讨论

本文基于汽车动力学模型预测货车以不同初速度在不同坡度上爬坡的速度数据,采用 MOVES 模型进行仿真出货车爬坡产生的碳排量数据,以坡度和初速度为自变量建立了货车碳排量模型,分析了货车碳排放规律,并结合规范^[11]分析了最大坡长指标下货车的碳排放。

表 12 不同坡度最高碳排量/坡长

设计速度 km/h	上坡初速度 km/h	纵坡坡度/%						
		2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
120	60	∞/∞	3 243/1 000	2 292/680	1 827/520	1 542/420	—	—
100	50	∞/∞	∞/∞	3 264/910	2 132/570	1 721/440	1 474/360	1 288/300
80	40	∞/∞	∞/∞	∞/∞	3 675/930	2 314/560	1 775/410	1 453/320

注:表中数值,分子为碳排量,单位 g;分母为坡长,单位 m。

货车上坡过程中产生的碳排量受初速度和坡度影响:初速度越大,碳排量越低,这与文献^[11]的研究结论一致;道路纵坡越大,货车爬坡产生的碳排量就越高,文献^[3,6,9]也得到了相同的结论。初速度越低、坡度越陡,货车的爬坡过程的碳排放增加越快;较高的初速度和较低的坡度有助于降低货车爬坡的碳排放速率。参考规范^[11]的道路设计过程中,建议采用高坡度和短坡长组合以减小货车爬坡产生的碳排放。

本研究中只考虑了重量功率比为 148 kg/kW 的货车,车型代表性有限,其他类型的货车爬坡的碳排放还有待研究。采用动力学模型求解车速时,没有考虑实际交通条件下交通流对货车速度的影响,

复杂交通条件下的货车碳排放模型有待考虑。通过 MOVES 获取货车碳排放数据,仿真参数过于理想化,有待实测数据对模型进行验证。未来的研究可以进一步考虑复杂交通流条件下不同车型的货车爬坡的碳排放情况。

7 结语

货车在爬坡时产生的二氧化碳显著影响环境,本文提出了一种量化货车爬坡的碳排放模型,可以为环保型道路建设提供定性和定量的参考,文章的主要结论如下。

(1)道路纵坡坡度和爬坡的初速度对货车碳排

放影响显著:随着货车爬坡初速度的增大,货车碳排量降低,随着道路纵坡坡度的增大,货车碳排量增大;当货车爬坡初速度为 10 km/h,坡度为 9%时,货车的碳排量是初速度为 90 km/h,坡度为 0 的 3 倍。

(2)货车爬坡初速度越大,碳排量对坡度的敏感性越低,当初速度为 10 km/h 时,货车碳排量对 2.4%以上的坡度呈高敏感性,随着初速度增大,高敏感性比例降低,当初速度为 90 km/h 时,货车碳排量对 5.4%以上的坡度呈高敏感性;道路纵坡坡度越大,碳排量对初速度的敏感性越高,当坡度低于 1.1%时,碳排量对初速度呈低敏感性,当坡度大于 1.1%时,高敏感性比例增加,当坡度高于 6.8%时,碳排量对初速度呈高敏感性。

(3)参考规范^[11]的工程设计中,给定设计速度时,采用的纵坡坡度越大,规范^[11]允许的最大坡长越短,货车的最高碳排量越低;所以为了降低货车爬坡产生的碳排放,建议采用较高的设计坡度和较短的设计坡长组合。

参考文献:

- [1] Pachauri R, Reisinger A. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[J]. Journal of Romance Studies, 2014, 4(2): 85—88.
- [2] Myers M B. Ethnocentrism: A Literature Overview and Directions for Future Research[M]// Proceedings of the 1995 Academy of Marketing Science(AMS) Annual Conference. Springer International Publishing, 2015.
- [3] Dong Y, Xu J, Gu C. Modelling carbon emissions of diesel trucks on longitudinal slope sections in China[J]. PLOS ONE, 2020, 15(1): 17—29.
- [4] Zhang X, Xu J, Li M, et al. Modeling Impacts of Highway Circular Curve Elements on Heavy-Duty Diesel Trucks' CO₂ Emissions [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(14): 35—41.
- [5] Dong Y, Xu J, Li M, et al. Association of Carbon Emissions and Circular Curve in Northwestern China[J]. Sustainability, 2019, 11(4): 32—39.
- [6] Boriboonsomsin K, Barth M. Impacts of Road Grade on Fuel Consumption and Carbon Dioxide Emissions Evidenced by Use of Advanced Navigation Systems[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2010, 2139(2139): 21—30.
- [7] Xu J, Dong Y, Yan M. A Model for Estimating Passenger-Car Carbon Emissions that Accounts for Uphill, Downhill and Flat Roads [J]. Sustainability, 2020, 12(1): 17—22.
- [8] Demir E, Bekta T, Laporte G. A comparative analysis of several vehicle emission models for road freight transportation [J]. Transportation Research Part D Transport and Environment, 2011, 16(5): 347—357.
- [9] Ko M, Lord D, Zietsman J. Environmentally Conscious Highway Design for Crest Vertical Curves[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2012, 2270(1): 96—106.
- [10] Lan C J, Menendez M. Truck Speed Profile Models for Critical Length of Grade[J]. Journal of Transportation Engineering, 2003, 129(4): 408—419.
- [11] JTG D20—2017 公路路线设计规范[S].
- [12] Rakha H, Lucic I, Demarchi S H, et al. Vehicle Dynamics Model for Predicting Maximum Truck Acceleration Levels [J]. Journal of Transportation Engineering, 2006, 127(5): 418—425.
- [13] Smith Gary L. Commercial vehicle performance and fuel economy[C]. SAE International, 1970;
- [14] 余志生. 汽车理论: 第 3 版[M]. 机械工业出版社, 2000.
- [15] Bester, Christo. Truck Speed Profiles [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2000, 17(1): 111—115.
- [16] 许金良, 景立竹, 韩跃杰, 燕孟华. 基于 MOVES 的小半径圆曲线路段载重柴油车碳排放预测模型 [J]. 公路交通科技, 2018, 35(1): 124—131+158.
- [17] 郑丽君, 朱庆云, 李雪静. 我国汽柴油质量升级步伐加快 [J]. 中国石化, 2017, (3): 39—42.
- [18] Dong Y, Xu J, Liu X, et al. Carbon Emissions and Expressway Traffic Flow Patterns in China [J]. Sustainability, 2019, 11(10): 24—28.
- [19] 黄冠涛. 基于 MOVES 的微观层次交通排放评价 [D]. 北京交通大学, 2011.