

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.01.002

# 智能网联交通系统碳减排效益评估与实证研究<sup>\*</sup>

王彩凤<sup>1</sup>, 祁昊<sup>1</sup>, 吴忠宜<sup>1</sup>, 李成<sup>1</sup>, 智涵祯<sup>2</sup>

(1. 交通运输部科学研究院, 北京 100029; 2. 百度在线网络技术(北京)有限公司, 北京 100085)

**摘要:** 作为缓解城市交通拥堵与碳排放问题的重要手段, 智能网联系统在提升城市路网通行能力与交通出行效率、减少车辆出行能耗与碳排放等方面具有重要作用。为了定量评估智能网联交通系统的实际碳减排效益, 文中通过分析智能网联交通系统的基本特征与碳减排基本原理, 分别对信号交叉口与道路路段两个城市路网重要组成场景建立碳排放测算模型; 根据北京市高级别自动驾驶示范区的实际交通运行状况数据, 对智能网联交通系统实施前后碳减排效益进行定量测算与对比分析。

**关键词:** 城市交通; 智能网联交通系统; 碳减排效益; 碳排放测算模型

中图分类号: U491.92

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)01-0011-06

目前, 主要从微观、中观、宏观 3 个层次进行城市交通碳排放研究。在微观层面, Abou-Senna H. 等通过 VISSIM 和移动源排放测算模型(MOVES)对交通量、速度、载质量、道路状态等与碳排放之间的关系进行了研究<sup>[1]</sup>; Ahn K. 等基于全球定位系统信息, 对道路类型和碳排放之间的关系进行了研究<sup>[2]</sup>。研究发现, 仅选择高速道路行驶并不能有效降低交通排放量, 建议在路径选择中适当选取一定比例的低速路段并减少激进驾驶行为, 以实现更好的节能减排效果。在中观层面, 程颖等利用车载排气排放物检测设备采集的不同道路等级下汽车排气排放物排放数据, 对不同模型计算的碳排放因子精度进行了对比分析<sup>[3]</sup>。在宏观层面, Burón J. M. 等利用 NEI 体系, 将交通规划模型 EMME/2 和排放模型 MOBILE 整合, 建立了加拿大宏观层次下路网机动车排放测算模型 CALMOB6, 该模型能反映真实的当地碳排放强度<sup>[4]</sup>; 李健等采用 IPCC 自上而下方法, 分析了京津冀地区机动车常规污染物(CO、NO<sub>x</sub>、HC、PM<sub>2.5</sub>等)的排放特征及不同省市的排放物贡献度<sup>[5]</sup>。目前关于碳排放的研究主要集中在模型利用及改进方面, 对结合先进技术进行碳排放评估的研究较少。为此, 本文从智能网联交通系统碳减排原理入手, 结合现有研究建立典型交通场景下智能网联交通系统碳排放测算模型, 实现对城市智能网联交通系统碳减排的测算与评估。

## 1 智能网联交通系统碳减排基本原理

普通城市道路交叉口和道路路段对城市交通运行通畅、能源消耗和碳排放等具有重要影响。缺乏智能技术支持的情况下, 驾驶人难以准确获知交通流和信号灯情况, 导致不必要的驾驶行为, 增加延误时间、燃油消耗和污染物排放量。异常情况下, 驾驶人无法及时获取相关信息, 影响车辆行驶效率和安全性, 降低交通流量和行驶速度, 进一步增加能源消耗和污染物排放量。

智能网联技术的快速发展在改善城市道路交通状况和降低污染物排放方面起到重要作用。如图 1 所示, 智能网联交通系统基于路侧感知设备和智能网联系统先进技术<sup>[6-7]</sup>, 实现对城市道路交叉口信号

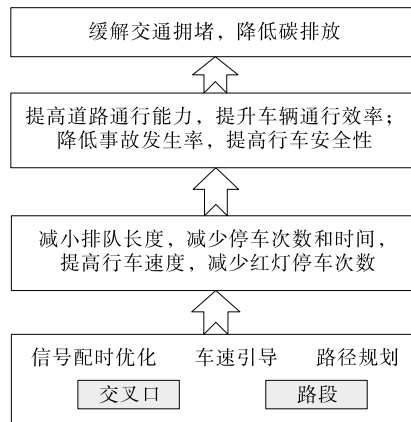


图 1 智能网联系统碳减排基本原理

<sup>\*</sup> 基金项目: 中央科研院所基本科研业务费专项资金(20234807); 智能网联、智慧停车碳减排效益研究与评估(2022148030)

配时的优化,同时对城市道路和交叉口内通行的车辆进行路径规划及车速引导,减小排队长度,减少停车时间及停车次数等,从而提高城市道路通行能力,提升车辆通行效率,避免交通事故及事故导致的道路拥堵,有效缓解交通拥堵,促进城市交通减排。

## 2 智能网联交通系统碳减排效益评估方法

### 2.1 信号交叉口碳排放测算方法

根据智能网联系统碳减排原理,车辆在交叉口会产生急加减速变换、起/停操作及怠速等驾驶行为。车辆在不同运行状况下的碳排放不同,交叉口碳排放主要有三方面<sup>[8]</sup>:

(1) 减速阶段。减速阶段的碳排放是指车辆即将到达交叉口之前因前方为红灯由城市平均运营时速开始刹车减速至停驶过程中产生的碳排放,计算公式如下:

$$Q_{QE,y1} = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I q_{PN,i,j,p} \times Q_{PA,i,p} \quad (1)$$

式中: $Q_{QE,y1}$ 为第  $y$  年车辆进入交叉口时减速阶段的碳排放量(t); $q_{PN,i,j,p}$ 为第  $j$  天通过第  $i$  个交叉口的单日交通量(辆); $p$  为车辆类型; $Q_{PA,i,p}$ 为车辆进入第  $i$  个交叉口时减速阶段的碳排放量(g/辆)。

(2) 怠速阶段。怠速阶段的碳排放是指车辆在交叉口因红灯停车怠速过程中产生的碳排放,计算公式如下:

$$Q_{QE,y2} = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I q_{PN,i,j,p} \times R_{MP,i,p} \times T_{i,j,p} \quad (2)$$

式中: $Q_{QE,y2}$ 为第  $y$  年车辆在交叉口怠速过程中产生的碳排放量(t); $R_{MP,i,p}$ 为第  $i$  个交叉口进口道单车怠速温室气体排放速率[g/(s·辆)]; $T_{i,j,p}$ 为第  $j$  天第  $i$  个交叉口各进口道车辆的平均延误时间(s)。

(3) 加速阶段。加速阶段的碳排放是指车辆启动加油时产生的碳排放,计算公式如下:

$$Q_{QE,y3} = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I q_{PN,i,j,p} \times Q_{PD,i,p} \quad (3)$$

式中: $Q_{QE,y3}$ 为第  $y$  年车辆在交叉口启动加油时产生的碳排放量(t); $Q_{PD,i,p}$ 为车辆在第  $i$  个交叉口等待红灯结束后驶出交叉口的过程中加速阶段的碳排放量(g/辆)。

综上,交叉口的碳排放为:

$$Q_{QE,y} = Q_{QE,y1} + Q_{QE,y2} + Q_{QE,y3} \quad (4)$$

式中: $Q_{QE,y}$ 为第  $y$  年交叉口的碳排放量(t)。

### 2.2 道路路段碳排放测算方法

根据已有研究成果,影响城市道路路段碳排放

的因素主要包括道路通行量、车辆行驶里程、行驶速度、碳排放因子等。基于城市交通运输活动碳排放评估 ASIF 法,结合路段碳排放计算方法<sup>[9-10]</sup>,考虑项目路段运行数据等,路段日碳排放量计算公式为:

$$K_{i,j} = q_{VT,i,j,p,d} \times D_{BD,i,d} \times F_{EF,i,p,d} \quad (5)$$

式中: $K_{i,j}$ 为第  $y$  年第  $j$  天第  $i$  个路段的日碳排放量(t); $q_{VT,i,j,p,d}$ 为第  $j$  天第  $i$  个路段的单日交通量(辆); $d$  为道路等级; $D_{BD,i,d}$ 为第  $i$  个路段的行驶距离(km); $F_{EF,i,p,d}$ 为第  $i$  个路段车辆行驶时的碳排放因子(g/km),根据机动车速度、道路条件、车辆载质量、车型等因素确定。

路段的年碳排放量为:

$$Q_{OE,y} = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I K_{i,j} \quad (6)$$

式中: $Q_{OE,y}$ 为第  $y$  年路段的碳排放量(t)。

### 2.3 智能网联交通系统碳减排效益评估

在已知智能网联系统实施前后各信号交叉口与道路路段碳排放量的基础上,可按式计算城市道路网碳减排总量  $Q_{SE,y}$ :

$$Q_{SE,y} = (Q_{QE,y,u} - Q_{QE,y,v}) + (Q_{OE,y,u} - Q_{OE,y,v}) \quad (7)$$

式中: $Q_{QE,y,u}$ 、 $Q_{QE,y,v}$ 分别为第  $y$  年智能网联项目实施前后信号交叉口的碳排放总量; $Q_{OE,y,u}$ 、 $Q_{OE,y,v}$ 分别为第  $y$  年智能网联项目实施前后道路路段的碳排放量。

## 3 实例验证

北京市高级别自动驾驶示范区位于北京大兴亦庄,是全球首个高级别自动驾驶示范区,预计 3 年内铺设网联道路 300 km,完成 332 个路口的智能化改造。

### 3.1 数据采集

研究所采集数据主要包括智能网联实施前后信号交叉口和道路路段的相关数据,共收集 3 个交叉口和 5 条路段信息,数据时间维度为 2022 年智能网联项目实施前后各一周(2022 年 6 月 8—14 日、2022 年 9 月 19—25 日)的数据。3 个信号交叉口分别为科创八街与经海路交叉口(交叉口 1)、科创八街与经海三路交叉口(交叉口 2)、中和街与永昌北路交叉口(交叉口 3),5 条道路路段分别为经海路中段路段(科创六街—科创八街,路段 1)、经海三路路段(科创六街—科创八街,路段 2)、经海一路路段(科创六街—科创八街,路段 3)、荣京东街—科创

五街路段(荣京东街与荣华路交叉口—科创五街与经海路交叉口,路段 4)、永昌北路路段(万源街—中和街,路段 5),交叉口和路段实景见图 2。



①~⑧分别为交叉口 1、交叉口 2、交叉口 3、路段 1、路段 2、路段 3、路段 4、路段 5

图 2 交叉口和路段分布

3.1.1 交叉口数据分析

信号交叉口相关数据主要包括交叉口名称、日期、时间、交通量、平均排队长度和平均延误等(见表 1)。

主要以小汽车为研究对象,由于缺少小汽车车型数据,暂不考虑车型类别,只考虑汽油小汽车。根据已有车载排放测试和 MOVES 模型,计算交叉口碳排放评估模型中参数值,结果见表 2。

对交叉口采集数据进行分析,智能网联项目实施前后平均排队长度和延误时间对比分别见图 3、图 4,智能网联项目实施后交叉口平均排队长度和延误时间的变化见表 3。由图 3、图 4、表 3 可知:智能网联项目实施后 3 个交叉口的平均排队长度和平均延误时间都得到改善。

表 1 交叉口采集数据样例

序号	交叉口名称	日期	时间	交通量/辆	平均排队长度/m	平均延误/s
1	科创八街与经海路交叉口	2022-06-13	8:00—8:15	113	24.12	4.12
2	科创八街与经海路交叉口	2022-06-13	8:15—8:30	199		5.46
3	科创八街与经海路交叉口	2022-06-13	8:30—8:45	208		12.54
4	科创八街与经海路交叉口	2022-06-13	8:45—9:00	210		19.09
5	科创八街与经海路交叉口	2022-06-13	9:00—9:15	139	15.84	5.48
6	科创八街与经海路交叉口	2022-06-13	9:15—9:30	125		13.79
7	科创八街与经海路交叉口	2022-06-13	9:30—9:45	71		10.12
8	科创八街与经海路交叉口	2022-06-13	9:45—10:00	88		3.50

表 2 相关参数描述<sup>[11]</sup>

参数	参数描述	参数值
$Q_{PA}/(g \cdot 辆^{-1})$	小汽车在进入交叉口时减速阶段的碳排放量	14
$R_{MP}/[g \cdot (s \cdot 辆)^{-1}]$	交叉口进口道小汽车单车怠速温室气体排放速率	0.09
$Q_{PD}/(g \cdot 辆^{-1})$	小汽车等待红灯结束后驶出交叉口过程中加速阶段的碳排放量	24
$N/辆$	1 h 内交叉口进口道通过的小汽车数量	实地调查
$T/s$	小汽车在交叉口排队等待的平均时间,即平均延误时间	实地调查

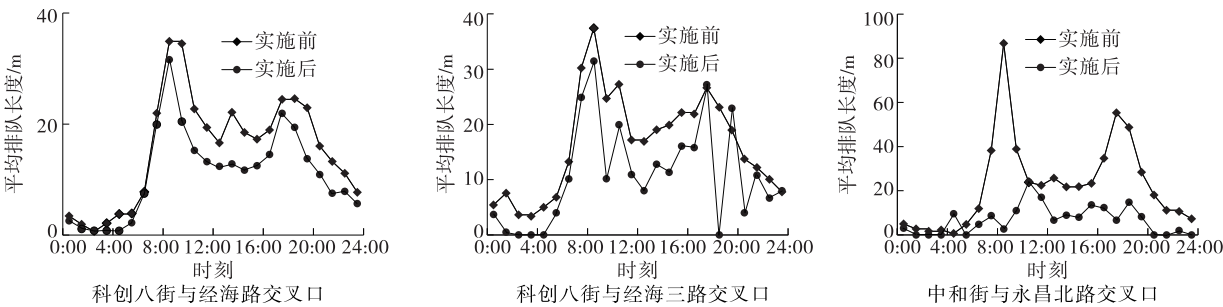


图 3 智能网联项目实施前后交叉口排队长度对比

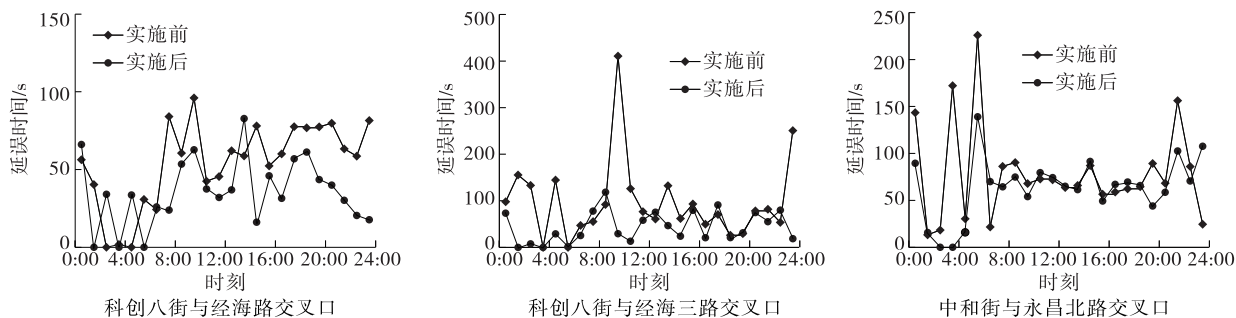


图 4 智能网联项目实施前后交叉口延误时间对比

表 3 智能网联项目实施后交叉口排队长度和延误时间的变化

单位: %

交叉口名称	平均排队长度降幅	高峰期排队长度降幅	平均延误时间降幅	延误时间峰值降幅
科创八街与经海路交叉口	27.91	11.43	34.82	6.25
科创八街与经海三路交叉口	34.21	15.88	54.74	71.22
中和街与永昌北路交叉口	70.29	72.34	19.33	39.57

### 3.1.2 路段数据分析

道路路段数据主要包括路段名称、起终点交叉

口名称、日期、时间、交通量、平均车速和平均行程时间等(见表 4)。

表 4 路段采集数据样例

序号	道路名称	起点交叉口名称	终点交叉口名称	日期	时间	交通量/辆	平均车速/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	平均行程 时间/s
1	经海路中段	科创六街与经海路交叉口	科创八街与经海路交叉口	2022-06-13	7:45—8:00	81	36.18	86.6
2	经海路中段	科创六街与经海路交叉口	科创八街与经海路交叉口	2022-06-13	8:00—8:15	161	29.41	99.0
3	经海路中段	科创六街与经海路交叉口	科创八街与经海路交叉口	2022-06-13	8:15—8:30	219	28.44	111.0
4	经海路中段	科创六街与经海路交叉口	科创八街与经海路交叉口	2022-06-13	8:30—8:45	190	29.27	104.5
5	经海路中段	科创六街与经海路交叉口	科创八街与经海路交叉口	2022-06-13	8:45—9:00	217	31.64	93.9

由于缺少小汽车车型数据和道路等级数据,计算时不考虑车型类别和道路等级,代表车型统一为 1.6 L 排量小汽车,其单车行驶速度与二氧化碳排放强度的关系见图 5<sup>[12]</sup>。参考城市交通碳排放因子数据库等<sup>[13]</sup>,确定代表车型行驶速度为 15 km/h、20 km/h、25 km/h、30 km/h 时的碳排放强度分别

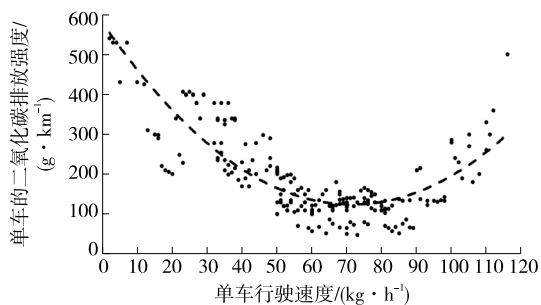


图 5 1.6 L 排量小汽车行驶速度与二氧化碳排放强度的关系

为 362 g/km、342 g/km、312 g/km、280 g/km。

对道路路段采集数据进行分析,智能网联项目实施前后经海路中段、经海三路、荣京东街—科创五街 3 个路段的交通量和平均车速对比见图 6,智能网联项目实施后路段交通量和平均车速的变化见表 5。由图 6、表 5 可知:智能网联项目实施后路段交通量和平均车速都得到提升。

## 3.2 效果评估

### 3.2.1 交叉口碳减排分析

核算 3 个交叉口的碳排放情况,智能网联项目实施前后交叉口日均碳排放量对比见图 7。由图 7 可知:智能网联项目实施后 3 个交叉口的日均碳排放量都明显降低,其中中和街与永昌北路交叉口的日均碳减排量最大。智能网联项目实施前后 3 个交叉口的年碳排放量分别为 283.61 t、128.48 t,智能网联项目实施后实现的年碳减排量为 155.13 t,交

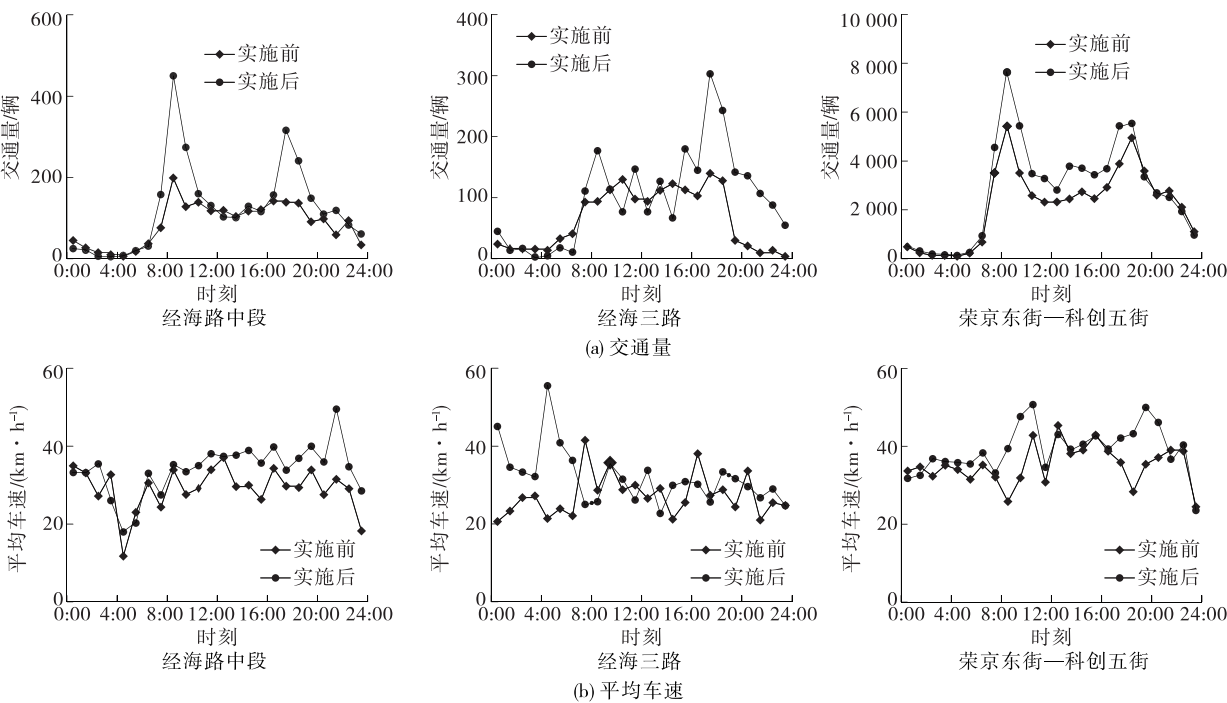


图 6 智能网联项目实施前后部分路段交通量和平均车速对比

表 5 智能网联项目实施后道路路段交通和平均车速的变化 单位: %

路段名称	交通量增幅	高峰期交通量增幅	平均车速增幅	平均车速谷值增幅
经海路中段	44.19	126.00	16.93	52.77
经海三路	51.52	116.43	17.38	7.98
经海一路	40.00	53.89	10.44	40.08
荣京东街—科创五街	25.27	40.79	11.39	8.70
永昌北路	39.36	112.90	4.21	18.50

叉口的平均年碳减排量为 51.71 t。北京市高级别自动驾驶示范区一期和二期共建设 332 个路口,据此估算,该项目实现的年碳减排量为 17 167.72 t,交叉口碳减排率为 54.70%。

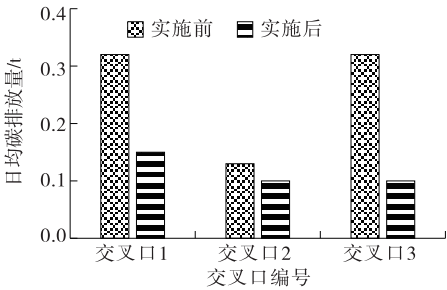


图 7 智能网联项目实施前后交叉口日均碳排放量对比

3.2.2 路段碳减排分析

核算 5 个路段的碳排放情况,智能网联项目实施前后路段日均碳排放量对比见图 8。

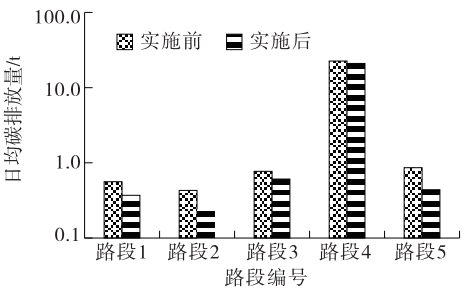


图 8 智能网联项目实施前后路段日均碳排放量对比

由图 8 可知:路段 4(荣京东街—科创五街)的碳排放量较大,该路段为主要交通走廊,交通量较大,因而碳排放量也较大。智能网联项目实施后,5 个路段的日均碳排放量都有所降低,其中荣京东街—科创五街路段的日均碳减排量为 1.58 t,其他 4 个路段的平均日均碳减排量为 0.24 t。考虑交通走廊及普通道路长度的影响,通过加权的方式,根据

特征路段长度占比测算北京市高级别自动驾驶示范区智能网联项目实施后年碳排放量为 70 132.54 t, 项目实施前年碳排放量为 103 699.27 t, 预计每年实现碳减排量 33 566.73 t, 碳减排率为 32.37%。

### 3.2.3 项目碳减排分析

综上所述,北京市高级别自动驾驶示范区智能网联项目全部建成后,预计每年实现碳减排量 50 734.45 t,智能网联系统在降低城市交通碳排放方面具有显著效果。

## 4 结论

本文通过分析智能网联交通系统的基本特征与碳减排基本原理,提出基于信号交叉口与道路路段的智能网联系统碳排放测算模型,并以北京市高级别自动驾驶示范区为例进行碳减排效益实例验证,预估其智能网联交通系统能实现年碳减排量约 5.1 万 t,碳减排效益显著。其中信号交叉口预计实现年碳减排量约 1.7 万 t,道路路段预计实现年碳减排量约 3.4 万 t,约为信号交叉口的 2 倍,智能网联系统对优化道路路段通行效率和减少碳排放的效果更突出。但由于当前未能获取车辆组成、燃料类型等详细数据,仅通过假设采用标准参数值,后续研究中须进一步细化,提升智能网联系统碳减排效益评估方法的精度与准确性。

### 参考文献:

[1] 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.

- [2] AHN K, RAKHA H. The effects of route choice decisions on vehicle energy consumption and emissions[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2008, 13(3): 151-167.
- [3] 程颖, 于雷, 王宏图, 等. 基于 PEMS 的 MOBILE 与 COPERT 排放模型对比研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(3): 176-181.
- [4] BURÓN J M, APARICIO F, IZQUIERDO Ó, et al. Estimation of the input data for the prediction of road transportation emissions in Spain from 2000 to 2010 considering several scenarios[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(30): 5585-5596.
- [5] 李健, 李莹莹, 王秋圆. 区域机动车污染物总量排放特征与削减量分配[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(8): 141-148.
- [6] 陈韬, 蔡博, 回春. 基于场景元素的智能网联汽车场景构建研究[J]. 公路与汽运, 2019(6): 9-12.
- [7] 宿增强. 动态感知与智能网联发展方向探讨[J]. 中国交通信息化, 2020(增刊): 30-32.
- [8] 黄冠涛. 基于 MOVES 的微观层次交通排放评价[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [9] 张秀媛, 杨新苗, 闫琰. 城市交通能耗和碳排放统计测算方法研究[J]. 中国软科学, 2014(6): 142-150.
- [10] HE D Q, MENG F, WANG M Q, et al. Impacts of urban transportation mode split on CO<sub>2</sub> emissions in Jinan, China[J]. Energies, 2011, 4(4): 685-699.
- [11] 李苗苗, 吕欢. 台州市信号灯交叉口碳排放测算及优化策略[J]. 交通节能与环保, 2022, 18(1): 5-8.
- [12] 李振宇, 宋伟男, 路熙, 等. 智能信控系统碳减排效益评估方法与实证研究[J]. 交通运输研究, 2022, 8(3): 49-55.
- [13] 德国国际合作机构. 城市交通部门如何核算温室气体排放[R]. 北京: 德国国际合作机构北京办公室, 2012.

收稿日期: 2023-07-01

\*\*\*\*\*  
(上接第 10 页)

[19] 易平. 基于汽车与两轮车碰撞事故的自动紧急制动系统性能研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.

[20] 胡林, 易平, 黄晶, 等. 基于真实事故案例的自动紧急制动系统两轮车测试场景研究[J]. 汽车工程, 2018, 40(12): 1435-1446+1453.

[21] 苏占领, 谭龙, 徐建勋, 等. 基于前车偏置场景的 AEB 系统性能测试与分析[J]. 公路与汽运, 2023(1): 1-4+26.

收稿日期: 2023-06-05