

Research  
Sustainable Infrastructure—Article

## 出行者信息服务 App 对城市大气环境质量的效益评估

黄文柯<sup>a,b</sup>, 胡明伟<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518000, China

<sup>b</sup> Shenzhen Nanshan Urban Planning and Land Resource Research Center, Shenzhen 518000, China

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 4 November 2017

Revised 3 December 2017

Accepted 3 January 2018

Available online 22 March 2018

#### 关键词

实时交通信息

移动终端

环境效益

智能体建模

### 摘要

随着车辆保有量和年均行驶里程的快速增长, 中国大城市的机动车尾气排放问题愈发严峻。本文研究了出行者信息服务 App (尤其是导航类 App) 在改善整个交通网络运行效率的同时, 是否能降低尾气排放。出行者信息服务 App 提供的实时交通信息, 不仅可以帮助出行者躲避拥堵, 还会对出行者的出发时间、出行方式等造成影响。这种个体行为的变化, 是否有利于提升城市的整体空气质量? 以及可以在多大程度上降低机动车的尾气排放? 我们试图揭示导航类 App 提供的实时交通信息对城市空气质量的影响, 研究成果可为城市交通政策和环境政策的制定提供参考。

© 2018 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

中国交通运输业迅速发展, 已成为空气污染的主要来源。急剧增长的机动车数量与有限的城市道路资源之间的矛盾日益突出, 许多大城市面临严重的交通拥堵和大气环境质量下降[1,2]。这些问题导致巨大的经济损失并制约着城市的可持续发展[3]。而智能交通系统(intelligent transportation system, ITS)为交通效率的提升和环境空气质量的改善提供了有效的平台和抓手[5]。

随着信息通信技术(information communications technology, ICT)的发展和智能手机的普及, 出行者信息服务App得以广泛应用[4–6]。这些App按功能可划分为电子地图、导航、停车诱导等。在导航App中, 在中国最受欢迎的是高德地图和百度地图。借助移动终端

App, 出行者可以获得大量的交通信息, 并且可以知晓出行前和出行途中的交通状况, 出行者的出行计划(如交通方式、出发时间以及出行路线)将随之调整, 从而提高出行效率, 进而使整个交通网络的通行能力得到有效利用, 达到节省机动车的燃料消耗、甚至降低尾气排放的效果。

然而, 国内外关于交通信息对大气环境质量的影响的研究较少。尽管交通信息对城市交通影响的已有研究较多, 但基本集中于传统的发布方式, 如广播、电视、可变信息标志和互联网门户网站等。这些方式并非获取实时信息的最佳方式, 特别是对在途中的出行者而言。而移动互联终端出行信息的发布模式, 近两三年才普及推广。目前少有针对这种实时出行信息发布媒介的研究, 在环境效益评估方面的研究也就更少。

\* Corresponding author.

E-mail address: [humw@szu.edu.cn](mailto:humw@szu.edu.cn) (M. Hu)

本文采用多方法建模的技术，在复杂系统仿真软件AnyLogic和机动车尾气排放模拟器（motor vehicle emission simulator, MOVES）的支持下，将出行者行为模型、交通仿真模型和尾气排放模型进行整合。构建智能体模型（agent-based model, ABM），模拟出行者在出行者信息服务App诱导下的出行行为；然后，将出行行为映射在城市交通网络上，最后使用MOVES计算整个道路网络的尾气排放清单，即采用从下向上的非集计方法重点研究出行者行为和环境效益之间的关系，并为城市交通政策的制定提供参考。

## 2. 建模方法

### 2.1. 模型概述

本文基于复杂系统理论，建立出行者行为模型、交通仿真模型和尾气排放模型的多方法模型体系，在动态时空水平系统中全面评价出行者信息服务App的交通和环境效益。综合仿真模型体系的技术线路如图1所示。首先，构建出行者ABM，考虑不同交通状况下出行信息对出行者行为的影响。其次，构建微观交通仿真模型，详细模拟出行者行为对交通发生与吸引、交通分布、交通方式和交通分配的影响。在此过程中，采集路网中每辆车逐秒的交通状态数据（如位置、速度和加速度等）作为模型下一步的输入。最后，使用机动车尾气排放模型在微观水平下测算污染物的排放情况，评价出行者信息服务App的节能减排效益。

本研究选择AnyLogic仿真平台和MOVES排放模

型搭建综合模型。AnyLogic软件以复杂系统理论为基础，同时支持3种建模方法：ABM、离散事件（discrete event model, DEM）和系统动力学（system dynamic, SD），并且支持以任意组合方式进行混合建模仿真[7,8]。出行者行为模型和交通仿真模型的结合打破了传统交通仿真模型难以模拟出行者行为的短板，使得模型仿真的结果和真实情况更为接近。而机动车尾气排放的测算采用美国环境保护署（EPA）研发的最新一代微观排放模型——MOVES，该模型是世界上先进的机动车尾气排放模拟器。

### 2.2. 出行者行为模型

ABM是主流的行为建模方法。该方法是对系统中各个仿真实体用智能体的方式从下向上对整个系统进行建模，试图通过对单个智能体的行为及其之间的交互关系来描述复杂系统的行为。相比于传统的从上向下的集计模型，该建模方法具有更贴近现实、效率高、可操作性强和可移植性较高等优势[7-9]。

本研究采用AnyLogic软件平台构建出行者ABM。ABM的过程主要包括3个步骤：①确定模型所涉及的智能体；②定义其行为，出行者ABM中除了具有基本属性（如性别、年龄和使用交通信息服务App的概率等）和驾驶特性（如舒适速度、最大加速度、最大减速度和变换车道的频率等）外，还可以构建变更出发时间、选择出行方式和动态变更出行路径等行为；③把具有自主行为的单个智能体放到环境中并建立彼此间的关系。在此方式下，系统整体将展现为很多个体行为交互的结果[7,8]。

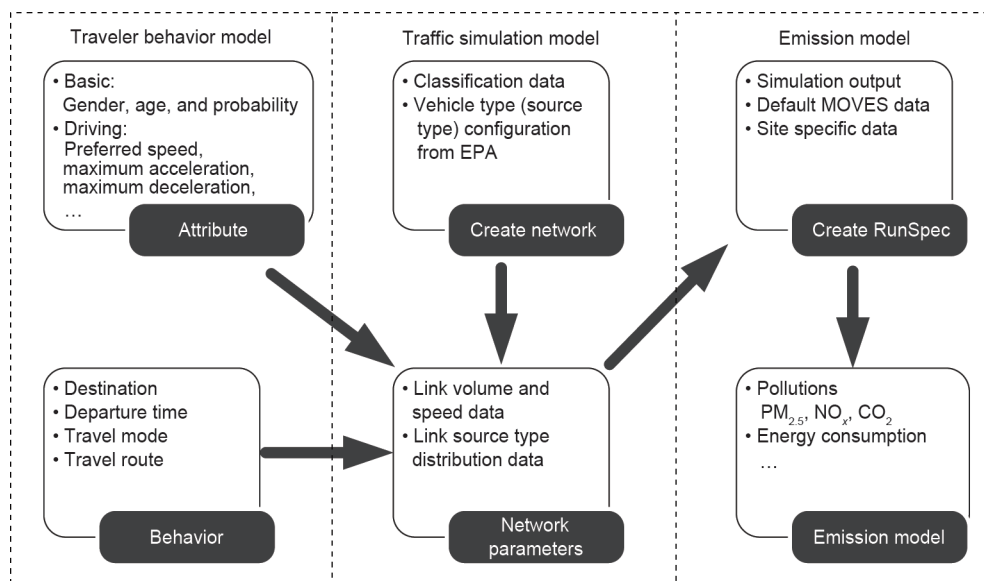


图1. 综合仿真模型技术线路图（RunSpec: 运行规格）。

信念-愿望-意图 (belief-desire-intention, BDI) 智能体模型是一种事件驱动模型。本文参考BDI模型[10-12], 将交通环境及交通设施作为智能体的“信念”(belief), 将目的地作为智能体的“愿望”(desire), 将搜寻路径、感知其他车辆、变道、躲避、超车、排队等行为作为智能体的“意图”(intention)。在每个仿真步长开始时, 出行者智能体将从意图集合中选择一个可行的动作作为当前实施的动作予以执行, 如图2所示。

### 2.3. 交通仿真模型

在AnyLogic 7.3版本中, 新增了道路交通库 (road traffic library), 该库可用于创建专业的交通仿真模型[13]。与其他交通仿真软件相比, AnyLogic具有开放式的体系结构, 能与其他软件及应用程序协同工作, 为交通仿真建模提供更大的灵活性[7,8,13-15]。

AnyLogic中的交通仿真建模, 主要包括环境搭建、交通流定义、运行仿真和结果分析4个步骤。环境仿真的目的是为对象提供必要的仿真环境。通过定义图形、添加相应的对象和设置动画属性, 构建环境对象。道路

环境主要包括道路、路口、停车线、停车场等[13,14]。

出行者驾驶行为是一系列与交通相关的活动, 受环境、生理和心理等因素的影响。因此, 机动车的活动使用流程图的方式定义, 即从道路交通库中拖动模块到工作空间中并设置属性, 然后按照活动发生的时间顺序将多个模块依次连接。在模型运行时, 机动车在规定的环境中运动, 并按照模拟的物理规则移动。常用的模拟机动车行为的模块有: car source, car dispose, 和 car go to等。除了这些模块外, 主要还有traffic light和road network descriptor模块[13,14]。

### 2.4. 机动车尾气排放模型

MOVES可用于测算道路机动车和非道路移动机械的排放因子和排放清单[16]。MOVES也可以用于测算宏观、中观和微观水平的空气污染物排放, 温室气体的排放以及一些有害物质。MOVES模型不同于以往的美国环境保护署的移动源排放模型, 其允许导入特定用户需求的数据。MOVES模型内置了一个全美相关排放信息的“默认”数据库。该数据库的数据来源有美国环境保护署的研究报告、人口普查局的机动车调查、联邦公路管理局的出行数据以及联邦、州、地方、行业和学术机构的数据等[17]。

该软件最新版本是于2015年底发布的MOVES2014a [16]。在该版本中, 排放因子得到了进一步的调校和丰富, 计算结果更精确。MOVES中的排放测算过程如图3所示, 其核心模型主要由4部分组成, 即总体行驶特征生成模块 (TAG)、运行工况分布生成模块 (OMDG)、排放源分布生成模块 (SBDG) 和排放测算模块 (EC) [18]。

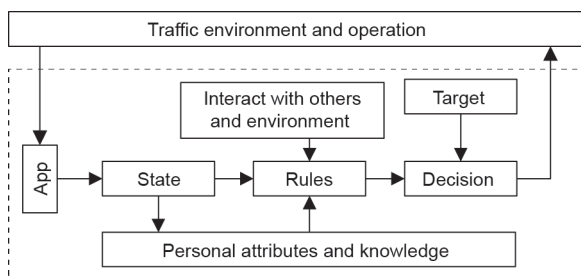


图2. 智能体模型结构图。

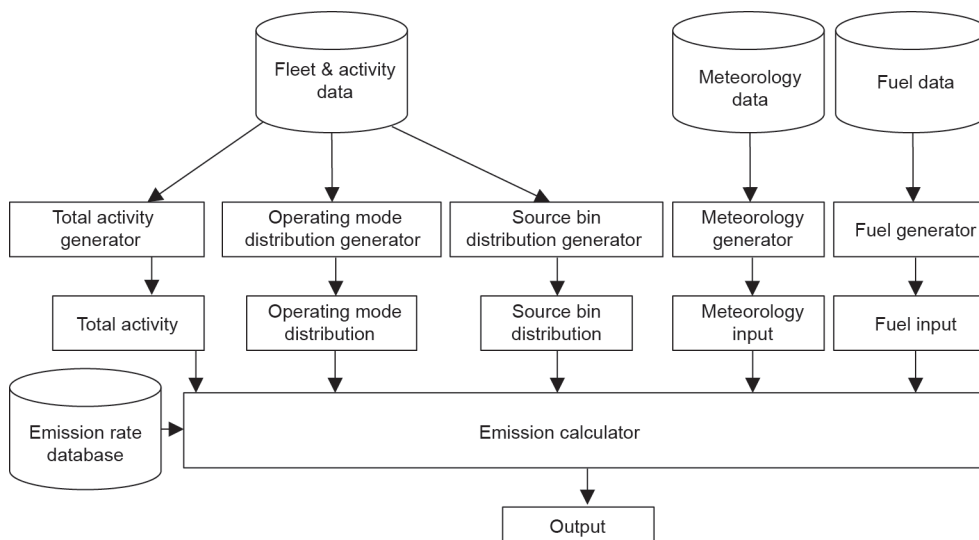


图3. MOVES模型计算流程。

MOVES的计算过程用数学公式表达如下:

$$TE_{\text{process, source type}} = \left( \sum ER_{\text{process, bin}} \times AC_{\text{bin}} \right) \times AJ_{\text{process}} \quad (1)$$

式中, TE为总排放量; process为排放过程(如运行排放、热启动排放、蒸发排放等); source type为排放源类型; bin为排放源的工况区间; ER为排放速率; AC为行驶特征; AJ为调整因子[17]。

MOVES模型针对不同的研究层次进行分析计算时,其数据输入管理界面和需要输入的数据也是不一样的。针对微观尺度的机动车污染物排放估算模型时,使用的数据库管理器为微观数据管理(project data manager, PDM)。构建MOVES微观模型包括3个步骤:第一步是设置RunSpec运行设置文件,其中包括:运行描述(description)、规模范围(scale)、时间跨度(time spans)、地理区域(geographic bounds)、车辆类型(vehicles/equipment)、道路类型(road type)、污染物种类(pollutants)、排放过程(processes)以及其他(others)。第二步是在PDM中创建一个微观层面的数据库来存储交通仿真模型输出的数据以及其他参数。其中,源于交通仿真的数据主要有车辆组成及其分布、卡车比例、路段长度、路段流量、路段平均速度、路段平均坡度、车龄分布和运行工况分布等。本地参数是指具有区域特征的信息,如燃料信息和气象条件。最后,经排放模型测算后便可得到排放清单[16]。

### 3. 案例研究

#### 3.1. 仿真区域

为了研究移动终端的出行者信息服务App对大气环境质量的影响,本研究在城市道路网络中挑选了具有代表性的一个小路网。在该路网中,有一段东西走向的快

速路和一段城市道路,这两段路通过匝道连接,在节点H处有一两相位的信号交叉口,如图4所示。假设在快速路的C点处因交通事件关闭一条车道(3车道变成2车道),使得该路段通行能力下降,进而导致交通拥堵。当拥堵达到一定程度时,该路况将会通过移动终端的出行者信息服务App及时发布给出行者。出行者将根据自身经验、偏好及其他因素,决定是否沿着当前道路继续前行(B→C→D→E,简称Route 2),或者通过出口匝道离开快速路在城市道路行驶一段距离后再从下一个入口处进入快速路(B→G→H→I→D→E,简称Route 1)。出行者的决定将影响路网的交通和排放。我们将基于多方法建模构建综合模型估算其环境效益。

#### 3.2. 建模

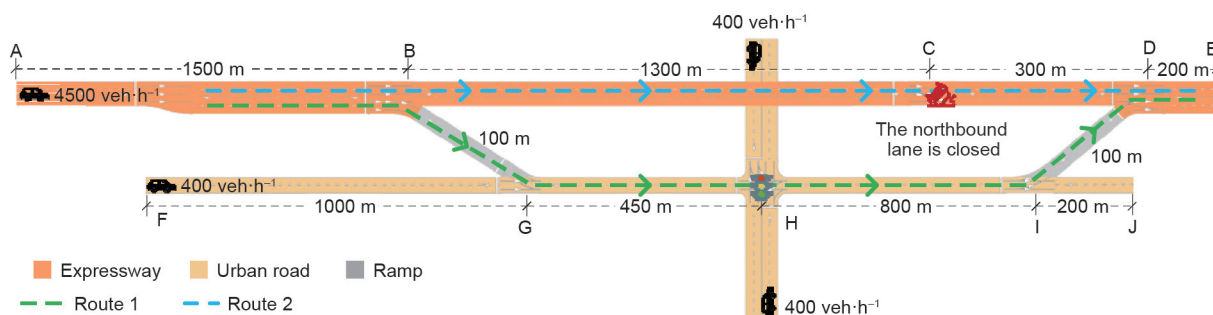
##### 3.2.1. 构建出行者行为模型

本案例的研究主体为已在途中的出行者,故在本文中仅考虑出行者的动态变更路径行为。由于个体差异,不同出行者对App发布的实时交通信息所采取的出行优化行为是不一样的。

如前面所述,本研究搭建了一个ABM来分析出行者行为和道路运行情况的关系。在出行者的ABM中,其行驶的路径默认为快速路(Route 2,图4)。当快速路前方出现拥堵时,出行者智能体将通过App来获取道路状况,然后根据出行时间长短选择路径。对于比较注重出行时间的出行者往往会选择Route 1,而部分出行者出于舒适度和习惯等因素的考虑会选择沿着当前的快速路继续前行。但是随着快速路的拥堵程度的增加,将会有越来越多的出行者采纳App发布的交通信息并提前从出口匝道离开快速路。

##### 3.2.2. 构建交通仿真模型

使用道路交通库中的环境标记模块绘制图4中的交



通道路，各路段的属性详见图4。

接下来，使用道路交通库中的行为模块搭建交通流程图，根据图4中的流量输入参数设置快速路和城市道路起点的输入流量，并将出行者按照出行线路分配到具体的交通网络中，如图5所示。交通状况信息会随道路状态的变化而自动更新，并通过移动终端App发布给出行者。最后，通过交通模型的模拟，获得交通网络的宏观数据以及微观数据并以此为基础对其环境效益进行评估。其中，宏观数据包括路段流量、平均速度等；微观数据主要包括每个时刻每辆车的加速度、速度等。根据需要，还可输出道路平均密度、行驶距离等统计数据。

### 3.2.3. 构建尾气排放模型

使用MOVES构建微观尺度的机动车污染物排放估算模型对出行者信息服务App的环境效益进行评估[18]。在本研究中，使用的微观参数的概况如表1所示。

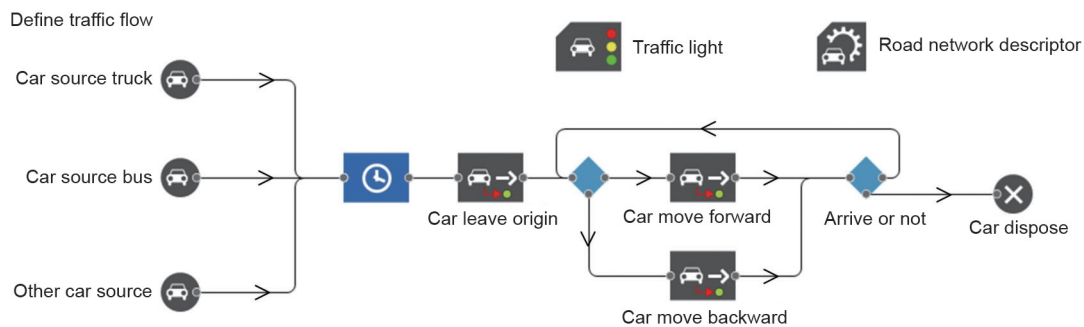


图5. 机动车活动定义。

## 4. 分析和讨论

本节将对无App诱导和有App诱导两种情况下的环境效益进行模拟和对比分析。然后根据移动终端的普及率以及出行者使用App查看交通信息的习惯，深入研究App使用率对环境的影响。

### 4.1. App 效益评估

通过移动终端的App获取实时交通信息，有助于出行者动态调整其出行路径。因此，快速路段和城市道路中的车辆平均密度和平均速度成周期性波动，如图6的(a)和(b)所示。其中，当快速路的服务水平较好时(阶段1)，后续的出行者将继续沿Route 2前行。随着车辆的不断到达，Route 2上的车流平均密度不断增加，拥堵蔓延。当交通拥堵导致Route 2和Route 1的时间比值大于出行者的忍耐阈值时，即快速路的路况较差

表1 仿真区域的参数汇总

Item	Detail
Location	Nanshan District, Shenzhen
Calendar year	2016
Month	June
Time	08:00–9:20 AM
Temperature	28–32 °C
Humidity	75.0%
Roadway type	Urban restricted access and urban unrestricted access
Type of vehicles	Passenger cars, buses, and long-haul combination trucks
Type of fuel	Gasoline for passenger cars; diesel for buses and trucks
Roadway length	12 links, see Fig. 4
Link traffic volume	Expressway: 4500 veh·h <sup>-1</sup> ; urban road: 400 veh·h <sup>-1</sup>
Link passenger car composition	85% passenger cars
Average road grade	0–5%
Link average speed	20–50 km·h <sup>-1</sup>
Pollutant process	Running exhaust emissions
Output	PM <sub>2.5</sub> , NO <sub>x</sub> , CO <sub>2</sub> , and fuel consumption

时(阶段2),后续的出行者将优先选择Route 1, Route 1上的车辆平均密度不断上升。另外,由于选择Route 1的车辆数不多,Route 1的密度上升一定幅度后就维持稳定,其道路的通行速度波动不大,且能够保持通畅,而Route 2的拥堵状况却得以渐渐缓解,其通行速度逐渐恢复。当两个路径的出行时间相当时,后续出行者中的大部分又将选择Route 2,进而呈现周期性的变化趋势[20]。

在无出行信息诱导的情况下,车辆无法及时通过C点,导致路段的拥堵程度加剧,车辆排队长度也逐渐增加,由A点到D点的平均出行时间为461 s;而有出行信息诱导的情况下,所有出行者在交通拥堵上浪费的时间大幅减少,A、D两点之间的平均出行时间为373 s,降低了19.1%。仿真结果表明出行者信息服务App可通过在瓶颈前分流部分车流到其他路段提高整个网络的交通效益[20],这也和发表在*Nature Communication*的成果结论相近[3]。

移动终端App的使用,同时可以达到节能减排的效果,如表2所示。在能源消耗方面,在App诱导的情况下,整个系统能耗降低了29.5%;在机动车主要污染物方面,NO<sub>x</sub>减排23.6%,而PM<sub>2.5</sub>的减排效果更佳,减排率为30.4%。

#### 4.2. App使用率对环境效益的影响

本研究针对不同App使用率对环境效益的影响进行了多次仿真实验。仿真结果表明,随着App使用率的提

高,当快速路发生拥堵时,将会有越来越多的驾驶员选择Route 1,如图7所示。而当使用率约为95%时,选择两条路径的比值约为1。这主要是因为部分驾驶员的忍耐阈值较高或其他自身原因不愿轻易变更路径。

然而,环境效益与使用率关系曲线呈U型,也就是说App使用率过低和过高,其环境效益都不是最佳,如图8所示。在App使用率约为30%的情况下,会有10%左右的车辆在Route 2较拥堵时选择Route 1,而这部分出行者更换路径的行为将大大提升整个系统的环境效益。以CO<sub>2</sub>为例,整个交通网络的排放量可从4923 kg·h<sup>-1</sup>降至3472 kg·h<sup>-1</sup>,减排率高达29%。

## 5. 结论

本文以ABM技术为核心,通过多方法建模模拟出行者获得实时交通信息后的行为,建立了包括ABM、交通仿真模型和排放模型的综合模型。该模型实现不同出行者之间的信息交互、出行者与服务提供者的交互(通过移动终端的App获得实时交通信息,并将出行映射到交通网络中),使得出行行为的模拟相对于传统的交通仿真而言更加贴近现实。

仿真结果表明移动终端App的诱导,可通过分流的方式帮助出行者提前躲避道路网络中的拥堵点,同时可降低机动车尾气的排放。在交通效益方面,研究结果和前人研究接近[3]。在环境效益方面,主要的机动车污染物排放量都显著减少,尤其是PM<sub>2.5</sub>和NO<sub>x</sub>。另外,针

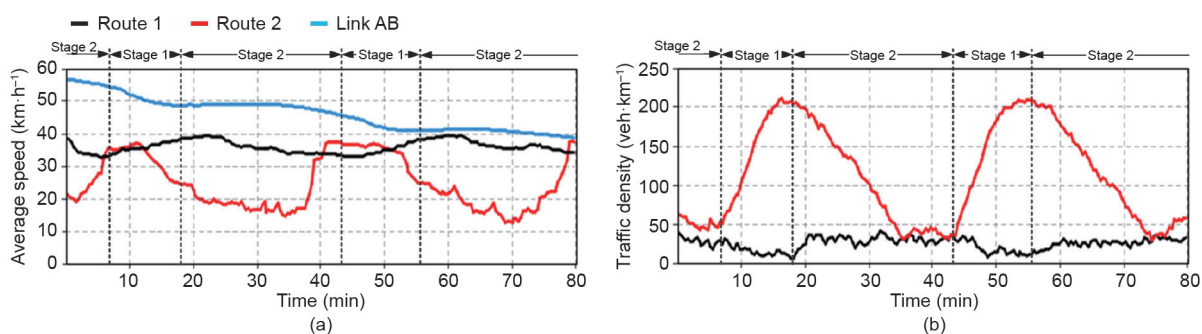


图6. 仿真结果比较。(a) 不同路段的平均速度;(b) 不同路段的密度。

表2 App诱导的环境效益

	PM <sub>2.5</sub> (kg·h <sup>-1</sup> )	NO <sub>x</sub> (kg·h <sup>-1</sup> )	CO <sub>2</sub> (kg·h <sup>-1</sup> )	Energy consumption (MJ·h <sup>-1</sup> )
Without app's guidance	0.92	17.8	4 923	67 732
With app's guidance	0.64	13.6	3 473	47 768
Environmental benefits (reduction rate)	30.4%	23.6%	29.5%	29.5%

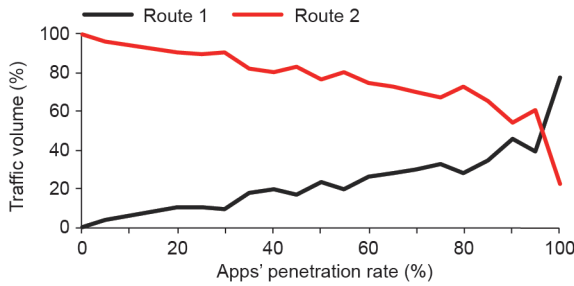


图7. App使用率和驾驶员的路径选择的关系。

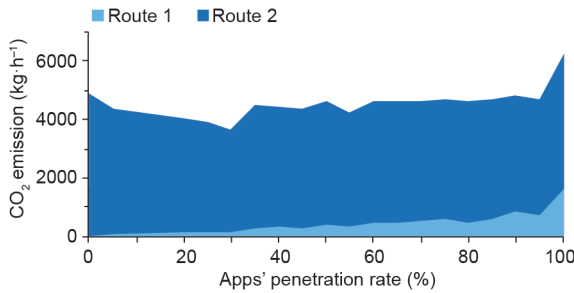


图8. App使用率和机动车的CO<sub>2</sub>排放量的关系。

对App使用率的敏感性分析表明，App使用率约30%时其环境效益最优。

本文基于多方法技术建立的综合仿真评价模型可以有效地在系统层面评估移动终端App等技术的推广对城市交通和城市大气环境质量的影响，为城市交通运营和管理提供技术支持。

## 致谢

感谢深圳市科技计划基金项目（编号：JCYJ20140418181958475）的资助和支持。

## Compliance with ethics guidelines

Wenke Huang and Mingwei Hu declare that they have

no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## References

- [1] National Bureau of Statistic of China. China statistical yearbook 2016. Beijing: China Statistics Press; 2017. Chinese.
- [2] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. 2017 China vehicle environmental management annual report. Beijing: Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China; 2017. Chinese.
- [3] Çolak S, Lima A, González MC. Understanding congested travel in urban areas. *Nat Commun* 2016;7:10793.
- [4] Ben-Elia E, Avineri E. Response to travel information: a behavioral review. *Transp Rev* 2015;35(3):352–77.
- [5] Klein I, Ben-Elia E. Emergence of cooperation in congested road networks using ICT and future and emerging technologies: a game-based review. *Transport Res C-Emer* 2016;72:10–28.
- [6] Klein I, Levy N, Ben-Elia E. An agent-based model of the emergence of cooperation and a fair and stable system optimum using ATIS on a simple road network. *Transport Res C-Emer* 2018;86:83–201.
- [7] Borshchev A. The big book of simulation modeling: multimethod modeling with Anylogic 6. Chicago: AnyLogic North America; 2013.
- [8] Hu MW, Huang WK. Pedestrian traffic simulation methods. Beijing: Tsinghua University Press; 2017. Chinese.
- [9] Abar S, Theodoropoulos GK, Lemarini P, O'Hare GMP. Agent based modelling and simulation tools: a review of the state-of-art software. *Comput Sci Rev* 2017;24:13–33.
- [10] Rao AS, Georgeff MP. Decision procedures for BDI logics. *J Log Comput* 1998;8(3):93–343.
- [11] Norling E. Folk psychology for human modelling: extending the BDI paradigm. In: Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems; 2004 Jul 19–23; New York, NY, USA. Washington, DC: IEEE Computer Society; 2004. p. 202–9.
- [12] Kim S, Son YJ, Tian Y, Chiu YC, Yang CYD. Cognition-based hierarchical en route planning for multi-agent traffic simulation. *Expert Syst Appl* 2017;85:335–47.
- [13] The AnyLogic Company. AnyLogic 8 tutorials. St. Petersburg: The AnyLogic Company; 2017.
- [14] The AnyLogic Company. AnyLogic 8 library reference guides. St. Petersburg: The AnyLogic Company; 2017.
- [15] Hu MW. A high-fidelity three-dimensional simulation method for evaluating passenger flow organization and facility layout at metro stations. *Simul-T Soc Mod Sim* 2017;93(10):841–51.
- [16] Assessment and Standards Division Office of Transportation and Air Quality. MOVES2014a user guide. Washington, DC: US Environmental Protection Agency; 2015.
- [17] Assessment and Standards Division Office of Transportation and Air Quality. MOVES2014 and MOVES2014a technical guidance. Using MOVES to prepare mission inventories for state implementation plans and transportation conformity. Washington, DC: US Environmental Protection Agency; 2015.
- [18] Assessment and Standards Division Office of Transportation and Air Quality. MOVES2014a software design reference manual. Washington, DC: US Environmental Protection Agency; 2015.
- [19] Abou-Senna H, Radwan E, Westerlund K, Cooper CD. Using a traffic simulation model (VISSIM) with an emissions model (MOVES) to predict emissions from vehicles on a limited-access highway. *J Air Waste Manag Assoc* 2013;63(7):819–31.
- [20] Hu MW, Huang WK, Chen Y. Evaluating the effects of alleviating urban traffic congestion using real-time traffic information on mobile devices. In: Proceedings of the 21st International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate; 2016 Dec 14–17; Hong Kong, China. Singapore: Springer Nature Singapore Pte. Ltd.; 2018. p. 689–700.