

# 适用于超大规模路网的轻量级动态交通 分配仿真平台 *DTALite*

周学松 唐金金 魏贺

**【摘要】**动态交通流分配可以反映路网交通流的拥挤性和交通需求的时变性，是下一代先进交通管理和规划的技术核心之一。通过准确的预测网络交通规律，大规模交通仿真系统可以运用有效手段通知和疏导驾驶者，从而缓解大城市中常规和突发的交通拥堵。本文介绍了轻量级开源动态交通分配仿真平台 *DTALite* 的理论应用、系统设计框架和开发模块，其突出特点包括：构造了严谨的改进型点排队、物理排队模型及基于动力波理论的拥堵外溢与消散模型模拟复杂的城市交通拥堵现象；实现了基于动态旅行时间的最短路快速算法；提出了不同于传统切割网络方法的并行仿真算法以大幅提升运算速度；开发了配套的 *NEXTA* 平台用于模拟结果演示和人机交互编辑，可对 *DTALite* 的仿真结果进行直观的图形化、动态化展示。同时阐述了中观仿真系统在中国应用的机遇及在理论、数据和计算诸方面的挑战。

**【关键词】**动态交通分配；中观交通模拟；*DTALITE*；交通拥堵

动态交通流分配(Dynamic Traffic Assignment, DTA)可以反映路网交通流的拥挤性和交通需求的时变性，是下一代先进交通管理和规划的技术核心之一。通过准确的预测网络交通规律，大规模交通仿真系统可以运用有效手段通知和疏导驾驶者，从而缓解大城市中常规和突发的交通拥堵。国内外专家学者对基于仿真的动态交通分配理论及其应用进行了大量研究并取得了丰硕的成果[1-11]。

2009年4月，美国运输研究委员会的网络建模分会(TRB ADB30)通过美国联邦公路局出行模型改善计划(Travel model improvement program, TMIP)邮件列表进行了动态交通分配仿真模型用户调查。其反馈结果表明，超过85%的受访者计划在2年内应用动态交通分配仿真工具；但受访者亦明确指出动态交通分配存在一些障碍，主要包括：对于大多数用户而言，动态交通分配比静态交通分配需要更多的数据，甚至需要难以获取及使用的数据（如信号配时数据）；建立较完整的动态交通分配模型需要消耗大量人力财力；模型构建投入成本的收益不确定；动态交通分配模型运行时间过长；底层建模方法不明晰。

早期的动态交通分配仿真软件以美国联邦公路局支持的 *DynaMIT*、*DynaSMART* 最为典型，在这两个平台基础上，研究者们相继开发了 *CUBE Avenue*（*CITILABS* 公司）、*TransModeler*（*CALIPAR* 公司）、*Dynameq*（*INRO* 公司）和 *DTALite*（*Dr. Zhou's Team*）等动态交通分配仿真软件。基于上述背景，新一代中观轻量级动态交通分配仿真平台 *DTALite*

应运而生。

在新的数据环境下，对城市交通的研究需要更精细化的分析手段。如何运用海量大数据进行更准确的动态交通预测和交通状态推估，需要城市规划、交通规划和交通工程等多学科深度协作层面的共同努力。如何利用“大计算—大分析”处理大数据应用仍是目前急需解决的问题。DTALITE 研发团队关注动态交通分配模型的后续开发，致力于融合多源大数据更好地解决交通出行和规划决策的关键问题，即在大数据、大计算、大分析和精细管理支持下，（准）实时动态交通分配应如何对出行者进行主动诱导并处理反馈信息，以实现系统最优与个体均衡及公平的双赢。

## 0 功能设计

DTALite 在功能模块设计中亦充分考虑以下需求：支持超大规模网络动态交通分配（典型网络为 2000 个交通小区，20000 个路段，200 万-1000 万辆模拟车）；方便快捷的基础数据管理操作模式；支持施工区管理、道路收费研究；支持基于动态费用、时间异构的动态路径选择模型；支持车辆尾气排放分析；支持交通安全研究；支持特殊条件下的动态仿真等。DTALite 包括基础数据管理、快速最短路计算、OD 需求反推校正、动态交通分配仿真和仿真结果展示等五大子系统及 14 个功能模块。

- (1) 基础数据管理子系统。多源数据中转处理与人机界面交互数据管理。
- (2) 最短路计算子系统。基于距离的时变最短路算法与基于旅行时间的时变最短路算法。
- (3) OD 需求反推校正子系统。自由流条件动态 OD 反推与拥堵流条件动态 OD 反推。
- (4) 动态交通分配子系统。事故影响预测、尾气排放估算、轻量级快速动态交通仿真与交通网络设计与评估。
- (5) 仿真结果展示子系统。交通网络状态动画显示、交通拥堵源点显示、车辆尾气排放图形化显示和车辆运行轨迹可视化分析。

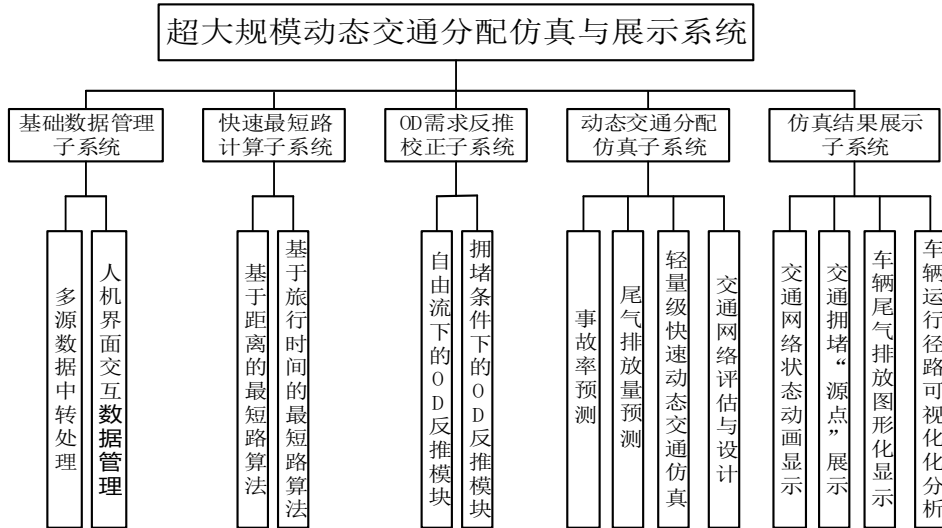


图 1 平台结构与功能模块组成

## 1 系统架构

DTALite 系统架构有效地实现各组件间的有机联系。其中，动态交通分配和中观交通仿真是最核心的组件；基于节点-路段网络结构的动态时变最短路算法模块，中观车辆/智能体生成器（将 OD 需求与全日出发时间曲线相结合），动态路径分配模块（考虑智能体路径选择和出发时间选择行为特点；可提供多种出行者信息供给策略，如历史信息、出行前信息和/或途中信息、VMS 信息板等；亦可提供将经济特征转换为广义旅行时间的道路收费策略），和由交通信息提供、需求管理以及交通场景管理（基于排队的交通流模型允许控制路段实时通行能力，如施工区、交通事故或匝道管控等），是动态交通分配和中观交通仿真的基础，为平台提供数据基础和算法基础；中观交通仿真结果则由 NEXTA 图形化用户界面直观展示。

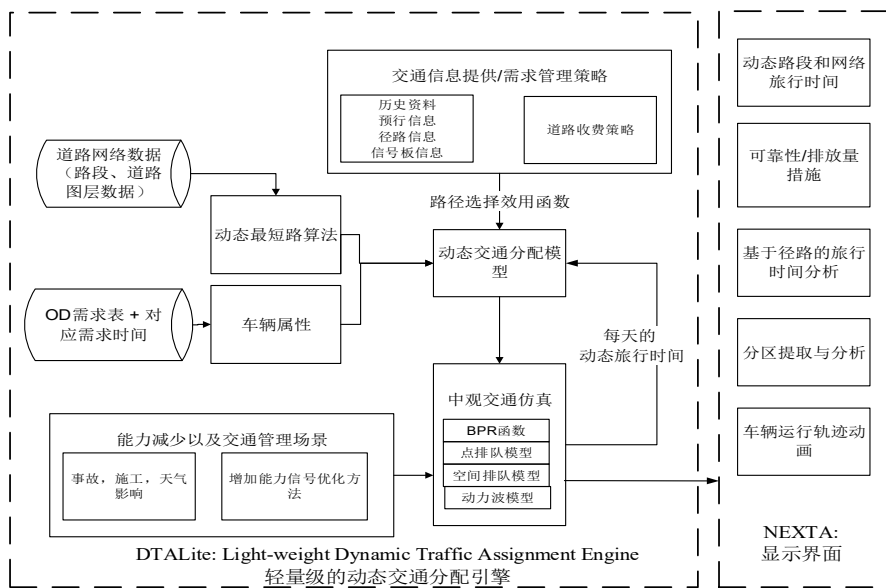


图 2 软件平台构架说明

## 2 工作流程

DTALite 通过数据中心子系统(Data Hub), 既可以将用户独特格式的数据转化为通用输入数据存储结构 (如 CUBE、VISUM、TransCAD 格式、谷歌 WGS84 格式等), 又可以将仿真输出文件转化为专业软件存储格式 (如微观模拟软件 VISSIM 和 Synchro, Google Earth 可视化 KML 格式等), 具体如下:

(1) 网络数据。通过关键字段转换和 GIS 拓扑编码支持静态交通模型的路网导入。

(2) 需求数据。通过 Matrix 表、Column 表、ASCII 文本和 Binary 文件支持交通小区及活动地点级别的出行需求导入。

(3) 控制数据。支持 Synchro 信号配时及相位数据导入或设置路口通行量及转向比例进行中微观层面分析。

为了提高运行效率, DTALite 将动态交通分配模型与模拟仿真框架进行一体化整合, 通过反复迭代来搜索稳态均衡条件。DTALite 通过构建一个多接口系统解决多粒度动态交通分析的三大难点, 即基础数据导入快速准确性、动态分配过程合理性和输出结果真实性。

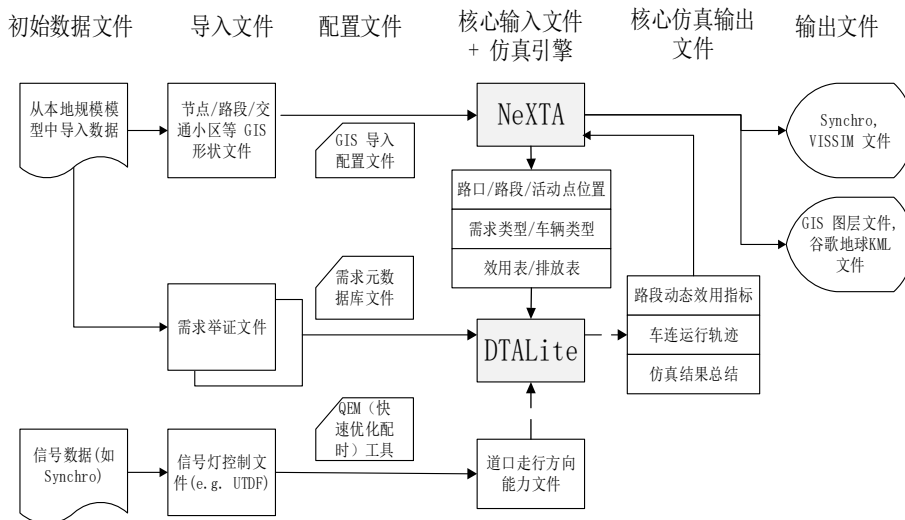


图 3 DTALite & NEXTA 平台工作流程图

## 3 核心技术

### 3.1 动态交通分配仿真

DTALite 通过“动态最短路径, 交通仿真”的两阶段迭代过程描述仿真车辆在交通路网上的运行状况。DTALite 利用路段、节点传输模型实现对车辆在路段内部运行和路段间转移的模拟。其中, 路段传输模型涉及交通流量-密度关系式, 理论通行能力主要由路段类型和车道数量; 节点转移模型涉及到左转和直行通行能力约束, 该能力约束主要取决于灯控路口的信号周期与绿信比和非灯控路段的其它属性。DTALite 所模拟车辆在路段上的旅行时间将

反馈到下次迭代的动态最短路模型中，进而为车辆选择特定径路提供决策依据。同时，新的径路均会被反馈到下一次迭代。

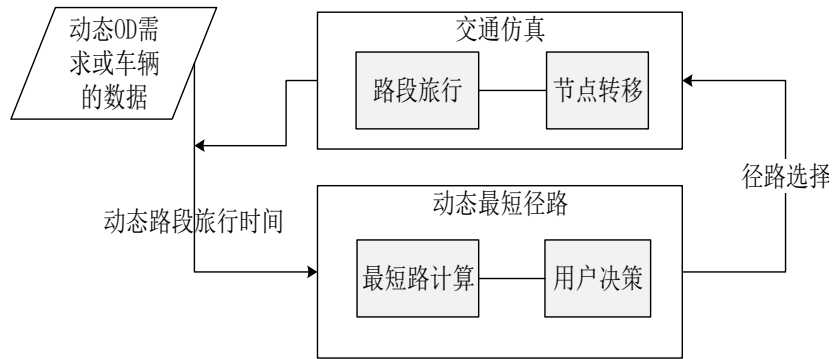


图 4 动态交通分配仿真平台基础框架

### 3.2 通行能力与交通流模型

为了捕捉拥堵流条件下的排队形成、回溢和消散，DTALite 利用简化交通流模型（排队模型，如点排队模型、空间排队模型、动力波模型）追踪排队的前向/后向传播。简化交通流模型仅需要少量参数，如驶入通行能力、驶出通行能力和路段存放通行能力约束。与传统的通行能力约束不同的是，动态交通分配模型中认为通行能力是可变的，路段负荷度不可能出现静态交通分配模型大于 1.0 的情况，同时路段存放通行能力由交通流密度确定。

基于流量—密度函数关系，有两种有限差分数值方法求解一阶动力波问题。Newell 的简化动力波模型<sup>[12-14]</sup>，利用路段累计流量跟踪动力波和排队传播；Daganzo 的元胞传输模型<sup>[15-17]</sup>，利用离散元胞间“供给—需求”和“发送—接收”框架描述交通流动态。DTALite 采用的是 Newell 简化动力波模型。

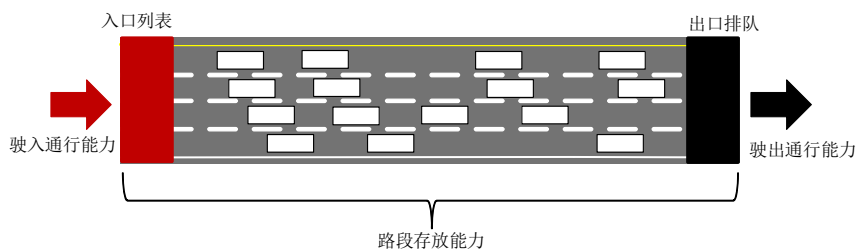


图 5 不同通行能力约束建模交通动态

### 3.3 简化排队模型

相比静态交通模型，动态交通分配模型所增加的驾驶行为策略将导致交通仿真过程中的径路选择等算法复杂度急剧增加。为了平衡出行行为仿真细节和计算效率，DTALite 采用中

观层面交通仿真模拟方法，并以此为基础嵌入了一系列的简化排队模型，如点排队模型、物理排队模型和基于动力波模型的累计数排队模型。以典型的点排队模型为例，其本质是将车辆排队纵向并置于一个堆栈中，即车辆被映射在物理路段（阴影）的垂直堆栈队列上，同时物理路段上车辆对应的实际车辆行驶速度为自由流速度。由于路段出口的通行能力约束，点排队模型可用来获取交通网络的主要拥堵瓶颈节点。

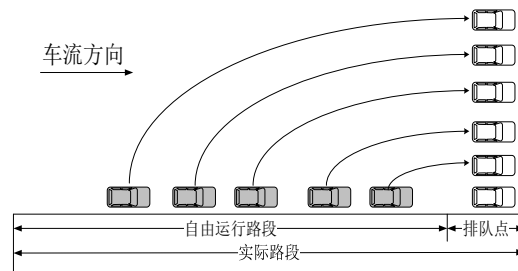


图 6 点排队模型

然而，点排队模型未考虑由路段存储能力(Storage capacity)所引起的拥堵回溢与衍生延误，为了真实反映交通拥堵特性，可通过增加物理空间能力约束的方法，将点排队模型转化为物理排队模型。物理排队模型与点排队模型的最大区别在于，物理排队过程受到路段入口、出口通行能力的共同影响。

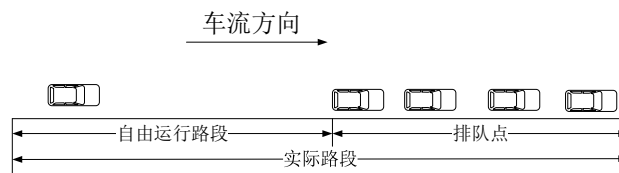


图 7 物理排队模型

### 3.4 基于简化动力波理论的拥堵传播模型

假设任意一条路段  $a$ ，依据 Newell 动力波模型描述，路段上车流具有 3 种状态变量：

- (1)  $A(a, t)$ ，表示累积流量，定义为通过上游节点进入路段  $a$  的总流量；
- (2)  $V(a, t)$ ，表示累积流量，定义为在  $t$  时刻，路段下游节点的垂直队列上等待的车辆数；
- (3)  $D(a, t)$ ，表示通过路段  $a$  下游节点流出的车辆数。

DTALite 借鉴 Hurdle&Son(2000)的理论框架<sup>[18]</sup>，基于 Newell 模型的累计车流量构造前向与后向波模型，能够较好、较快地模拟出拥堵的传播与消散过程。假设  $x$  是通道上的位置点， $N(x, t)$ 是  $t$ 时刻在某一路段  $x$  位置上的累计数量。 $N(x, t)$ 变化情况如公式(1)所示：

$$dN(x,t) = \frac{\partial N}{\partial x} dx + \frac{\partial N}{\partial t} dt = qdt - kdx \quad (1)$$

其中 $q$ 表示流率， $k$ 表示密度。波动过程表示某条道路上车流率和密度的变化关系，波速是可用 $w = \frac{\partial q}{\partial k} = \frac{dx}{dt}$ 表示。沿着波动方向，将 $dt = \frac{dx}{w}$ 代入公式(1)，可得公式(2)：

$$dN(x,t) = qdt - kdx = \left(-k + \frac{q}{w}\right) dx \quad (2)$$

### 3.5 基于智能体的路径选择模型

传统的静态交通模型通常假设出行者可获取完整的出行信息，路段具有确定的通行能力，为了反映现实日波动性和随机旅行时间的出行行为特点，DTALite 利用逐日学习(Day-to-day Learning)算法模拟不同交通信息提供策略，既出行者依据所经历和预测的平均旅行时间按照一定的比例(5%~15%)更新路线，进行最终路径选择。

DTALite 具有两种路径选择模型，基于交通小区(TAZ-Based)和基于智能体(Agent-Based)。基于交通小区的路径选择模型，与传统静态交通模型相同，从起点小区形心到终点小区形心，每辆模拟车辆具有相同的时间价值。基于智能体的路径选择模型，从起点小区到终点小区之间有多组活动地点(Activity Location)映射关系，每辆模拟车辆具有单独的时间价值（假设服从对数正态分布形式）和信息价值，可进行道路收费分析和出行信息服务研究。

基于智能体的路径选择模型中，每个智能体均具有多维度的出行决策。不同的起点、终点、出发时间和路线；不同的需求类型（低承载车辆 SOV、高承载车辆 HOV、卡车等）、出行目的类型（基于家的工作出行 HBW、基于假的其他出行 HBO、非基于家的出行 NHB）或交通控制类型（允许/不允许进入指定区域或使用某路段的出行）；不同的信息类型（历史信息 Historical、出行前信息 Pre-Trip、途中信息 En-Route 等）；独立的效用函数（时间价值、可靠性价值、安全价值等）；每个智能体单独执行路径选择算法，并可通过每次迭代调整起点、终点、出发时间和路线间的关系。

### 3.6 提高仿真器速度的并行计算技术

交通仿真并行计算中使用最广泛、最直接的方法是依据 CPU 内核总数，将道路拓扑网分割成不同的区域进行仿真，各区域之间数据交换以报文形式进行传递。其不足之处在于当 CPU 内核总数增加到一定数量时，按照内核总数划分的仿真区域数量相应提高，内核间数据的传递维度将出现暴涨，当 CPU 内核数达到某一数量后，数据传输能力受到制约，计算速度将难以提高。

基于上述问题，DTALite 并未采用传统切割道路网络的并行仿真算法，而是基于车与路

段、车与节点、路段与路段、路段与节点间的紧密关系，运用面向对象的思想，构建路段传输模型与节点转移模型。每个路段内部传输过程和每个节点转移过程均是独立的。因此，所有路段集合在路段的传输步骤以及所有节点集合在节点的转移步骤均可实现并行化处理，有效避免分割网络带来的数据交换压力，进而解决了传统并行计算方法无法充分利用多核 CPU 资源的问题，大幅度提高了运行速度。

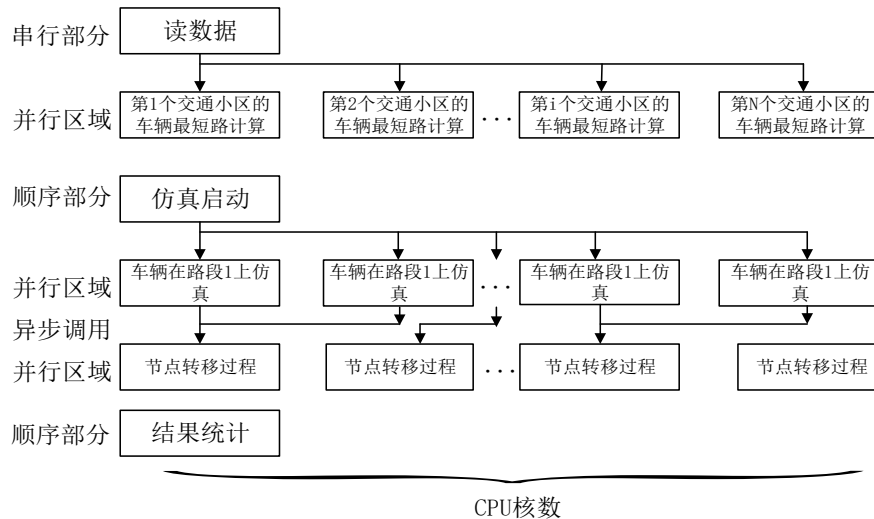


图 8 基于交通仿真和径路查找的并行计算

## 4 典型应用

目前，DTALite 在美国、欧洲、韩国、印度以及中国得到了广泛的应用。作为受美国联邦公路局资助开发的项目，该平台在美国如犹他州盐湖城市、马里兰州密西根州等地区应用最为广泛。在中国应用的主要城市有北京、长沙、青岛等。本文以北京市应用情况为例，简明介绍仿真平台综合效果。

仿真实验以全北京市道路网络为研究对象，包括 31807 个节点，15 种路段类型，89834 条路段，1928 个交通小区；模拟 OD 总流量约为 220 万辆，仿真时段为早高峰 7:00-9:00。

运行环境为，硬件设备笔记本 Think pad530，Intel i7 处理器（8 核），32G 内存；软件设备 Windows 7(x64)操作平台。

仿真场景设置，迭代次数为 20 次；路段交通流模型采用点排队模型；无信号灯数据，节点模型由路段能力模型控制；交通分配采用基于固定转移率 15%的弱用户均衡动态模型。

仿真结果为总运行时间约为 5 小时 43 分，次均迭代时间约为 20 分钟；平均旅行时间约为 45.7 分钟，平均旅行速度约为 11.6 公里/小时。交通密度仿真结果中，早高峰进城方向通道及环路明显高于其它道路，仿真结果与实际统计结果相近。拥堵瓶颈仿真结果中，瓶颈点大部分集中在快速路入口和出口匝道上，与实际观察较为接近。同时对宏观和中观仿真交通

流数据的统计对比亦表明，仿真结果能较准确地反映现实时变交通状态。

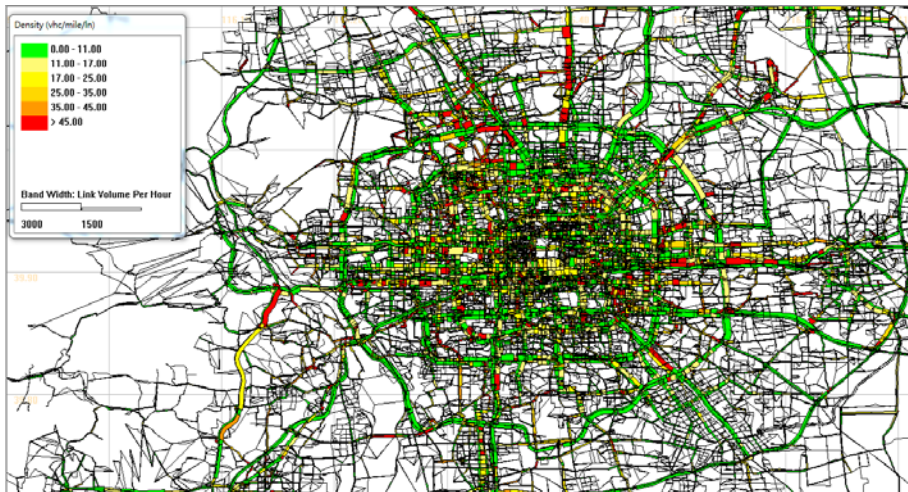


图 9 时变交通密度

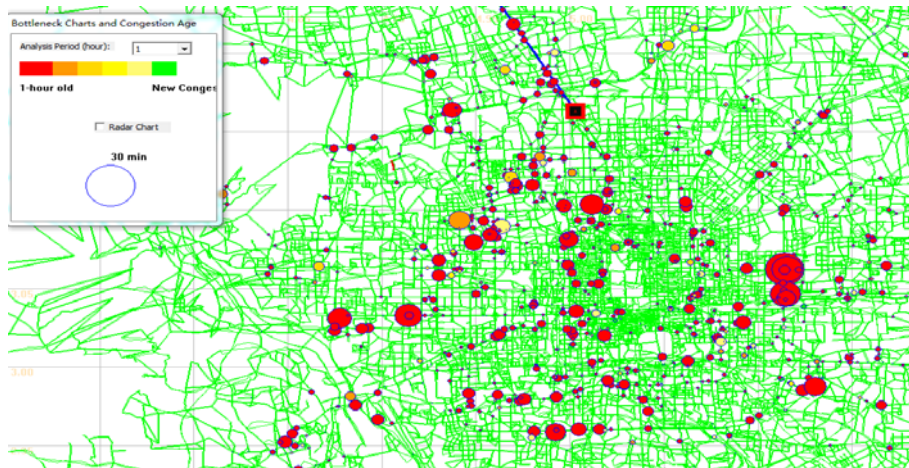


图 10 时变交通瓶颈点

## 5 结语

DATLite 作为新一代动态交通分配仿真软件，仿真运行所需基础数据可以直接利用既有静态交通数据快速建立动态仿真模型，进而降低人工成本。其独特的并行计算技术可极大地缩短运行时间，同时亦可模拟不同出行群体对交通政策反应的异质值，如路段动态收费政策等。此外，DTALite 还可利用路段观测速度和交通量进行动态 OD 矩阵反推与更新[19]。结合 MOVESLite 对拥堵条件下的车辆排放污染进行秒级别的高精度分析[20]。调用可视化工具，分析动态交通流量，如施工区作业影响判别、一体化交通走廊管理和实时旅行信息服务。

DATLite 研究团队将进一步构建适合中国的混合交通流模型，特别是将非机动车仿真纳入平台中。同时进一步梳理国际城市规划大数据研究与使用情况，为下一步研究提供有价值的参考。不遗余力地促进城市规划与交通规划之间理念与方法、理论与实践、数据与应用软件间的无缝对接。

注:

对 DTALite 感兴趣的读者, 可参考 DTALite White Paper[21]获取详细信息。

## 【参考文献】

- [1] Mahmassani H. S., Peeta S., Chang G. L., Junchaya T.. A Review of Dynamic Assignment and Traffic Simulation Models for ADIS/ATMS Applications [R]. Technical Report DTFH61-90-00074, the University of Texas at Austin, 1991.
- [2] Mahmassani H.S., Hu T. Y., Peeta S., Ziliaskopoulos A.. Development and Testing of Dynamic Traffic Assignment and Simulation Procedures for ATIS/ATMS Application [R]. Technical Report DTFH-61-90-R-00074-FG, FHWA, McLean, Virginia, 1994.
- [3] Cascetta E., Cantarella G. E.. Modelling Dynamics in Transportation Networks: State of The Art and Future Developments [J]. Simulation Practice and Theory, 1993, 1(2): 65-91.
- [4] 陆化普, 史其信, 殷亚峰. 动态交通分配理论的回顾与展望 [J]. 公路交通科技, 1996, 13(2): 34-43.
- [5] Peeta S., Ziliaskopoulos A. K.. Foundations of Dynamic Traffic Assignment: The Past, the Present and the Future [J]. Networks and Spatial Economics, 2001, 1(1): 233-265.
- [6] Mahmassani H. S.. Dynamic Network Traffic Assignment and Simulation Methodology for Advanced System Management Application [J]. Networks and Spatial Economics, 2001, 1(1): 267-292.
- [7] Boyce D. E., Lee D. H., Ran B.. Analytical Models of the Dynamic Traffic Assignment Problem [J]. Networks and Spatial Economics, 2001, 1(1): 377-390.
- [8] 高自友, 任华玲 著. 城市动态交通流分配模型与算法 [M]. 人民交通出版社, 北京, 2005.
- [9] Sezto W. Y., Lo H. K.. 动态交通分配:回顾与前瞻 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2005, 5(5): 85-120.
- [10] Mun J. S.. Traffic Performance Models for Dynamic Traffic Assignment: An Assessment of Existing Models [J]. Transport Reviews, 2007, 27(2): 231-249.
- [11] Sezto W. Y., Wong S. C.. Dynamic Traffic Assignment: Model Classifications and Recent Advances in Travel Choice Principles [J]. Central European Journal of Engineering, 2012, 2(1): 1-18.
- [12] Newell G. F.. A Simplified Theory of Kinematic Waves in Highway Traffic, Part I: General Theory [J]. Transportation Research Part B: Methodology, 1993, 27(4): 281-287.
- [13] Newell G. F.. A Simplified Theory of Kinematic Waves in Highway Traffic, Part II: Queuing at Freeway Bottlenecks [J]. Transportation Research Part B: Methodology, 1993, 27(4): 289-303.
- [14] Newell G. F.. A Simplified Theory of Kinematic Waves in Highway Traffic, Part III: Multi-Destination Flows [J]. Transportation Research Part B: Methodology, 1993, 27(4): 305-313.
- [15] Daganzo C. F.. The Cell Transmission Model: A Dynamic Representation of Highway Traffic Consistent With The Hydrodynamic Theory [J]. Transportation Research Part B: Methodology, 1994, 28(4): 269-287.
- [16] Daganzo C. F.. The Cell Transmission Model, Part II: Network Traffic [J]. Transportation Research Part B: Methodology, 1995, 29(2): 79-93.
- [17] Daganzo C. F.. In Traffic Flow, Cellular Automata = Kinematic Waves [J]. Transportation Research Part B: Methodology, 2006, 40(5): 396-403.
- [18] Hurdle V. F., Son B.. Road Test of a Freeway Model [J]. Transportation Research Part A: Practice and Policy, 2000, 37(7): 537-564.
- [19] Lu C. C., Zhou X. S., Zhang K. L.. Dynamic Origin-Destination Demand Flow Estimation under Congested Traffic Conditions [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 34(1): 16-37.
- [20] Zhou X. S., Tanvir S., Lei H., Taylor J., Liu B., Roupail N. M., Frey H. C.. Integrating a Simplified

Emission Estimation Model and Mesoscopic Dynamic Traffic Simulator to Efficiently Evaluate Emissions Impacts on Traffic Management Strategies [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2015, 37: 123-136.

[21] Zhou X. S., Taylor J.. DTALite: A Queue-Based Mesoscopic Traffic Simulator for Fast Model Evaluation and Calibration [J]. *Cogent Engineering*, 2014, 1(1): 961345.

### **【作者简介】**

周学松，男，博士，亚利桑那州立大学，副教授。电子信箱：xzhou74@asu.edu

唐金金，男，博士，北京交通大学交通运输学院

魏贺，男，硕士，北京市城市规划设计研究院