

时空行为视角下上海市早高峰拥堵的形成模式与规划应对*

Assessing the Formation Patterns and Planning Strategies of Morning Peak Congestion in Shanghai from the Spatio-temporal Behavior Perspective

涂鸿昌 晏龙旭 王德 胡杨 骆晓 TU Hongchang, YAN Longxu, WANG De, HU Yang, LUO Xiao

摘要 从时空行为视角溯源导致拥堵的出行原因,有助于理解拥堵形成的时空全过程。以上海市早高峰期间常发拥堵路段与机动车出行为研究对象,使用手机信令数据与交通态势数据进行交通流分配,还原出行的时空轨迹,从空间、时间、行为3个维度刻画早高峰拥堵形成的总体特征,解析具体路段的拥堵形成模式。发现拥堵的主要来源是沿内环、中环连片的居住密集区,去向主要集中在内环内的就业集中区;道路拥堵模式可归纳为“时空集中型”“出发集中型”“到达集中型”“时空分散型”4种主要类型;进而结合时空行为规划理论框架提出针对性的缓堵策略。从时空全过程视角认识道路拥堵的形成原因,可以为精细化的拥堵治理提供参考。

Abstract From the perspective of spatio-temporal behavior, tracing congested trips can help to understand the whole process of congestion formation. Taking the regular congested roads and motor vehicle trips during the morning peak period in Shanghai as the research object, this paper conducts traffic flow assignment based on mobile signaling data and traffic situation data to construct travel trajectories, portrays the spatial, temporal, and behavioral characteristics of congestion formation in Shanghai, and analyzes the congestion formation patterns of specific roads. Results indicate that the main origins of congestion are densely populated residential areas along the Inner Ring Road and Middle Ring Road, while the destinations are concentrated employment-intensive areas within the Inner Ring Road. The patterns of road congestion are categorized into four main types: space-time-concentrated type, origin-concentrated type, destination-concentrated type, and space-time-dispersed type. Strategies are proposed based on spatio-temporal activity planning theory. This study offers insights into the causes of road congestion formation from a holistic spatiotemporal perspective, providing valuable references for congestion management strategies.

关键词 城市时空行为规划;道路拥堵;手机信令数据;交通态势数据;交通流分配

Key words urban spatio-temporal activity planning; road congestion; mobile signaling data; traffic situation data; traffic flow assignment

文章编号 1673-8985 (2024) 02-0031-08 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j.supr.20240205

作者简介

涂鸿昌

同济大学建筑与城市规划学院

硕士研究生

晏龙旭 (通信作者)

同济大学建筑与城市规划学院

自然资源部国土空间智能规划技术重点实验室

副教授,博士,yanlongxu@tongji.edu.cn

王德

同济大学建筑与城市规划学院

教授,博士生导师

上海同济城市规划设计研究院有限公司

数字规划研究中心主任

胡杨

同济大学建筑与城市规划学院

博士研究生

骆晓

同济大学交通运输工程学院

副教授,博士

0 引言

城市道路拥堵是一种复杂的时空现象,反映了道路出行需求在时间和空间上的不平衡分布,即大量车辆在高峰时段汇聚到特定路段。传统的道路拥堵研究侧重于对拥堵道路节点的分析与预测,较少关注拥堵形成过程中的时间要素,难以解释拥堵形成的来龙去脉。而时空行为研究强调将空间和时间视为一个不

*基金项目:国家自然科学基金“‘本地—非本地’理论视角下大都市中心体系的功能构成模式与相互作用机制研究:以上海为例”(编号52208074);上海市科委自然科学基金“基于多源高空精度数据的人群大气污染物暴露及规划调控研究”(编号21ZR1466600);上海同济城市规划设计研究院有限公司暨长三角城市群智能规划协同创新中心科研课题“智能规划模拟评价系统开发与应用”(编号KY-2023-YB-B01)资助。

可分割的整体,关注以个体出行全过程中“时空—行为”的相互作用来解释时空现象,提供了一种理解拥堵形成的新理论视角和研究方法^[1]。基于时空行为视角,道路拥堵可以被理解为个体从出行发生到途经拥堵路段再到出行结束的完整过程。拥堵溯源分析有助于揭示不同时空行为特征的出行需求对拥堵的贡献,从而为制定精细化的缓堵策略提供参考。同时,大数据技术的进步使得持续记录和分析个体时空行为特征成为可能,也为开展道路拥堵的时空行为研究提供了新的机遇。

拥堵溯源方面,既有文献通常基于各类带有个体信息的出行轨迹数据集,分析个体出行对拥堵的贡献。例如,利用个体活动调查日志判断出行对拥堵的潜在贡献^[2],使用手机信令数据推断拥堵的源头区域^[3],或使用交通流分配方法模拟车辆出行轨迹进而追溯拥堵源头区^[4-6]。但这些研究仍然存在一定局限:在空间维度上侧重于拥堵源的区域识别,缺乏与具体城市空间的对应;在时间维度上聚焦拥堵发生时刻,缺乏对形成过程的系统分析;在应用层面上偏重拥堵成因诊断,较少提出缓堵对策。

时空行为规划理论为系统分析拥堵成因、制定缓堵策略提供了新的视角。该理论关注“时空—行为”的交互关系,旨在从空间、时间、行为3个维度统筹城市交通供需,实现出行需求在时空上的均衡分布,已在交通规划领域产生一定影响^[7-9]。理论框架方面,已形成以空间规划为基础、时间规划为辅助、行为规划为补充的层次化体系:空间规划主要通过优化城市功能布局、提升设施服务水平等措施引导交通需求的空间分布^[10];时间规划分为强制性时间管理^[11-12]和引导性时间建议^[13]两种方式,通过调节设施开放时间、出行时间等影响需求的时间分布;行为规划则包括被动干预(公共交通补贴、拥堵收费、远程办公等)^[14-16]和主动引导(智能出行建议、信息推送、鼓励共享出行等)^[17]两种策略,更直接地作用于个体出行决策。应用实践方面,欧美国家已经开展了较多缓堵探索^[18-19],而国内的相关实证研

究和实践探索相对较少^[20-21]。

作为我国超大城市,上海市交通拥堵问题较为突出^①。全面分析上海市道路拥堵的成因并提出规划应对策略,有助于实现智慧交通和可持续城市发展的目标^②。本文以上海市早高峰道路拥堵为例,尝试提出一种从时空行为视角分析拥堵成因的技术方法:通过定量指标对道路拥堵进行溯源分析,揭示主要拥堵贡献人群的时空出行特征,归纳典型路段的拥堵形成模式并提出潜在的时空行为规划策略。通过定量和定性相结合的分析,深化对道路拥堵内在机理的理解,以期为上海未来的交通规划与管理提供新的思路和参考。

1 研究数据与方法

1.1 技术路线

从时空行为视角来看,道路拥堵体现为不同交通主体的出行需求在时空上“聚集共现”。换言之,每一名“拥堵受害者”实际上也是“拥堵贡献者”。为了深入理解道路拥堵的形成模式以提出规划应对策略,可以从空间、时间、行为维度溯源拥堵贡献者的出行全过程,从而解释拥堵形成的内涵(见图1)。

本文选取常发拥堵路段^③作为研究对象,这些路段的拥堵一般不是由天气、交通事故、大型赛事等偶发因素导致的,而是具有一定的时空规律性,更能体现特定城市空间拥堵的一般性特征。研究思路如下:

首先,构建早高峰地面交通出行的时空轨迹数据集。以手机信令数据提取的出行OD作为交通发生量,基于交通拥堵态势数据中的

车速信息,使用随机多路径交通流分配法^④,模拟获得每个OD的时空轨迹。算法分3个步骤实现:(1)为每一个OD基于时耗计算10条最短路径;(2)以各路径与最短路径的时耗差作为阻抗,生成10条带有选择概率的时空轨迹;(3)根据概率随机选择1条轨迹作为结果。

其次,开展城市道路拥堵的总体溯源。筛选轨迹数据中集中遭遇拥堵的出行,定义为拥堵出行或拥堵人群。汇总所有拥堵人群经过拥堵路段长度的总和,定义为拥堵贡献里程,通过计算其在出发侧、到达侧的空间分布量和时间分布量,来刻画拥堵形成的空间(来源、去向)、时间(出发、途经、到达)与出行人群的特征。

再次,解析具体路段拥堵形成的时空行为模式。本文从空间、时间、行为3个关键维度,对每条拥堵路段定量溯源并划分类型(见表1)。在空间维度,提出拥堵出行的出发地、

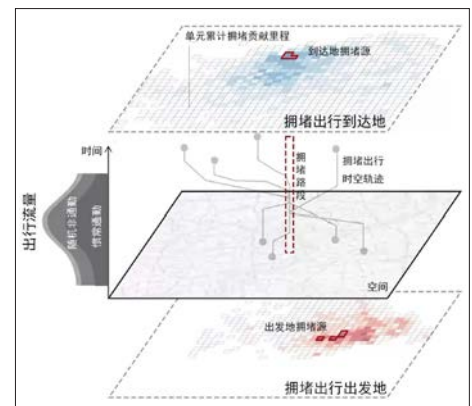


图1 时空行为视角下的道路拥堵溯源概念图
Fig.1 Tracing congested trips in view of spatio-temporal behavior

资料来源:笔者自绘。

表1 路段拥堵溯源的指标与类型划分

Tab.1 Indicators and patterns of tracing congested trips

维度	指标定义	拥堵类型
空间	拥堵源:一定范围内拥堵人数占路段总拥堵人数比例超过10%的O、D空间单元	在出发地、到达地存在拥堵源的拥堵称为“同O”“同D”,组合可分为“同O同D”“同O不同D”“不同O同D”和“不同O不同D”4种
时间	时间集中度:早高峰12个时段(15 min间隔)中,出行流量最大的4个时段流量占总流量的比例	“尖峰”(≥40%),“厚尾”(< 40%)
行为	拥堵主导人群:拥堵人数占比最高的人群	“惯常通勤人群主导”“随机非通勤人群主导”“其他人群主导” ^⑤

资料来源:笔者自制。

注释: ① 根据百度地图发布的《2022年度中国城市交通报告》,上海位列全国10大拥堵城市第3位。

② 《上海市城市总体规划(2017—2035年)》提出建设更可持续的韧性生态之城的目标,强调加强交通需求管理的发展方向。

③ 将连续5天同一时段均存在拥堵状态的路段定义为常发拥堵路段,否则为偶发拥堵路段。

④ 交通流分配方法主要有完全分配法、随机多路径分配法、迭代容量约束法、增量容量约束法和均衡分配法。随机多路径分配法相较于其他算法的优势主要有:一是能发挥拥堵态势数据的优势,结合分配后的出行轨迹定位拥堵路段、追溯拥堵人群;二是分配效果较好,优于完全分配法,与迭代容量约束法接近^[22];三是算法复杂度较低,易于实现。

⑤ 按出行目的、规律性将个体行为分为通勤出行与非通勤出行、惯常行为与随机行为。通勤行为与惯常行为存在强相关性,因此可将个体行为分为惯常通勤、随机非通勤、其他(惯常非通勤、随机通勤)。

到达地拥堵源概念,度量贡献路段拥堵的关键源头区域;对存在拥堵源的路段,针对性地开展源头管控将更有成效。在时间维度,定义拥堵时间集中度指标,度量路段流量的时变特征;高指标值表示拥堵存在明显的高峰时段,更适合采取错峰策略。在行为维度,定义拥堵主导人群指标,度量不同人群对路段拥堵的贡献差异;结合人群活动特征制定个性化引导策略,能够提高精准治理水平。

最后,对具体路段拥堵成因的特征进行综合分析,归纳典型的拥堵形成模式,并提出时空行为规划应对策略。

1.2 研究数据

拥堵态势数据方面,本文采用高德地图平台提供的交通态势API接口,获取上海市2020年11月2日—2020年11月6日(连续5个工作日)内早高峰时段(7:00—10:00,15 min间隔)的交通态势数据,其中包括拥堵路段名称、空间矢量、路况^⑥、车流速度等字段信息。为了简化问题,本文假设在15 min内每一条拥堵路段的路况、车流速度不发生变化。

手机信令数据方面,本文采用联通公司提供的2020年11月上海市手机信令数据,使用1 km网格汇总拥堵数据对应时段内的出行OD数据(根据联通系数扩样),其中包含出发网格位置、到达网格位置、出发时刻、出行人数、出行方式、出行目的等字段信息。筛选联通公司平台定义的“地面交通出行”且距离大于3 km的出行作为研究对象,即机动车出行。在此基础上,按出行目的与规律性划分人群属性:将OD组合为“家—工作地”“其他地—工作地”的出行人群识别为通勤人群;将1个月内同一OD空间位置机动车出行次数大于3次的人群视为惯常人群。

出行时空轨迹数据集方面,为了验证交通分配结果的有效性,随机抽取1 000条轨迹作为实验组,以高德地图导航推荐轨迹结果作为对照组(每一组出发时间相同)。结果表明,出行时耗、距离的 R^2 都大于0.9,在0.001水平上显著,平均绝对误差分别为200 s、582 m;

相似路段(容差50 m以内)总长度占比约80%,最远偏移距离的中位数仅为103 m,平均值为402 m。

2 道路拥堵的总体溯源结果

2.1 常发拥堵的基本特征

早高峰期间(7:00—10:00),浦西地区整体拥堵水平高于浦东(见图2)。其中,拥堵持续时长大于150 min的常发拥堵主要在浦西地区的快速路上呈线性连续分布,如外、中、内环以及进城方向高架;拥堵持续时长小于90 min的常发拥堵主要发生于主干道、次干道及支路(以下统称为“一般道路”),在郊区大型居住片区成片断续分布,如五个新城、莘庄、川沙。同时,道路等级与拥堵强度呈正相关:快速路平均拥堵时长最高,达129 min,而支路为80 min,表明在对常发拥堵进行治理时应优先关注城市快速路网。

2.2 拥堵溯源的OD空间特征

汇总全市范围内拥堵出行的来源与去向,可以揭示上海市域尺度拥堵的时空演化规律。从空间分布上来看(见图3),拥堵出行的主要出发地呈现“两片多核”的格局:内环、中环沿线的居住密集片区是引发全市拥堵的重要源区,尤其在浦西形成了南北向的两大集聚片区,如江湾、莘庄、凉城新村等;同时在外

围形成多个高值核心,以大型居住社区为主,如顾村等。相比之下,拥堵出行的主要到达地则高度集中于内环内的商务办公、科创产业等就业功能片区,并在局部形成高强度集聚点,如陆家嘴、南京东路、徐家汇、漕河泾、虹桥商务区等。

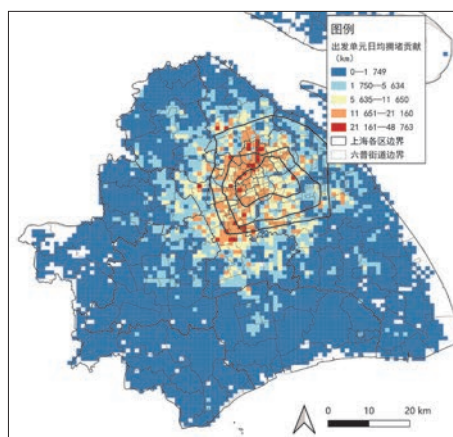
2.3 拥堵溯源的时间特征

按途经时间汇总全市拥堵贡献里程,并按出发、到达时间汇总拥堵人群总量(见图4)。结果表明,早高峰期间高峰形态明显,拥堵贡献人群的出发、到达高峰时段分别在8:00左右和8:30左右,5 min内出行人次均约8万人;途

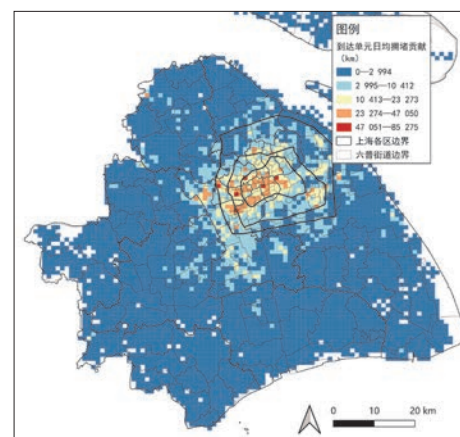


图2 常发拥堵路段的平均拥堵时长
Fig.2 Average duration of congestion on regular congested roads

资料来源:笔者自绘。



a 出发地



b 到达地

图3 拥堵出行的出发地和到达地分布

Fig.3 Origins (left) and destinations (right) of congested trips

资料来源:笔者自绘。

注释: ⑥ 高德地图中路况有通畅、缓行、拥堵、严重拥堵4种类型,本文将后3种定义为拥堵。

经高峰时段为8:00—8:30,平均每5 min内全市拥堵贡献总里程达30万km。拥堵贡献总里程与拥堵贡献出行人次呈正相关,人均贡献拥堵里程约为4.7 km,占总出行距离(17.3 km)的27%。

2.4 拥堵溯源的人群特征

从对全市拥堵的贡献总量来看(见图5),早高峰拥堵主要由惯常通勤人群和随机非通勤人群贡献:二者贡献总量接近,分别占43%、42%;二者对拥堵的贡献随时间发生变化,前者在8:30前占主导、后者在8:30后占更多。结合人均贡献情况可知,尽管随机非通勤人群(36%)出行量小于惯常通勤人群(48%),但由于其出行距离更长,因而人均拥堵贡献量(5.4 km)高于后者(4.1 km)。这表明在制定精细化缓堵策略时,既要重视通勤高峰期的需求引导,也需关注非通勤人群的行为优化。

进一步对比两类人群的空间分布发现,其出发地具有相似性(见图6),而到达地则存在明显差异(见图7)。其中,惯常通勤人群的拥堵出行到达地主要集中在传统商务办公区,高度依赖于就业岗位,如陆家嘴、漕河泾、

虹桥商务区等;而随机非通勤人群的拥堵出行到达地主要在浦西中环内分散、成片分布,主要受商业、医疗、交通枢纽等服务设施吸引,如徐家汇、新天地、瑞金医院、中山医院、虹桥枢纽等。

3 道路拥堵的时空行为模式解析

3.1 空间模式解析

为厘清各拥堵路段贡献出行在空间上的分布特征,基于前文所定义的空间维度指标,对其来源与去向的集聚程度进行评估。结果表明,58%的常发拥堵路段在出发侧存在拥堵源,55%的路段在到达侧存在拥堵源。进一步分析这些存在拥堵源路段的空间特征,

发现其中超过90%的路段拥堵源呈现聚集特征(只有一个拥堵源或多个拥堵源之间距离小于3 km),且拥堵源与拥堵路段的距离较近(拥堵源的中心点距离拥堵路段小于3 km),说明路段的拥堵基本受到单一拥堵源的影响,且空间作用距离较近。

基于拥堵出行首末点分布的异同,将常发拥堵归纳为4种典型的空形成模式(见图8)。其中,同O不同D型占25%,主要分布于大型居住片区通往就业中心的主次干道上,在外环内呈片状聚集分布,如江湾、凉城、漕河泾等街道,郊区则较为分散;不同O同D型占22%,主要分布于就业中心片区的主次干道上,如陆家嘴、张江、虹桥等街

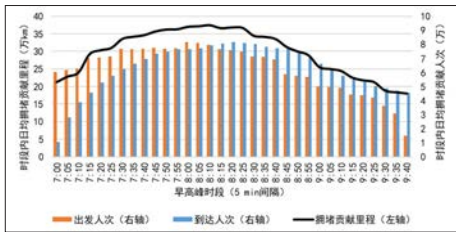


图4 拥堵贡献里程与拥堵人次的时间分布
Fig.4 Temporal distribution of congested miles and congested trips

资料来源:笔者自绘。

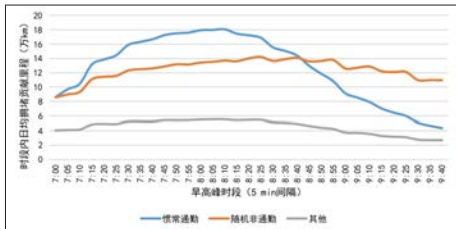
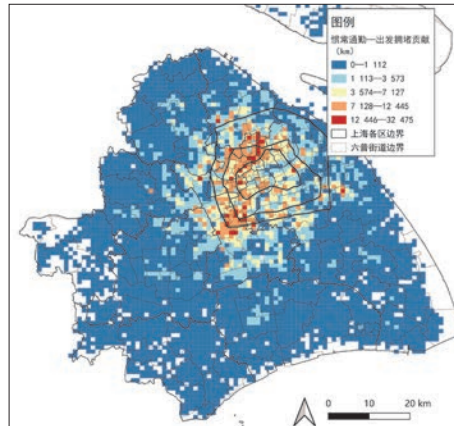


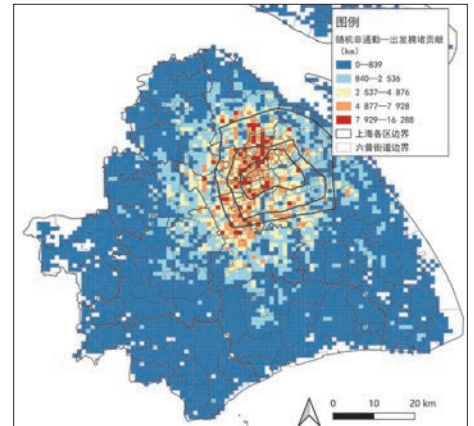
图5 各类人群的拥堵贡献里程
Fig.5 Congestion miles of population groups

资料来源:笔者自绘。



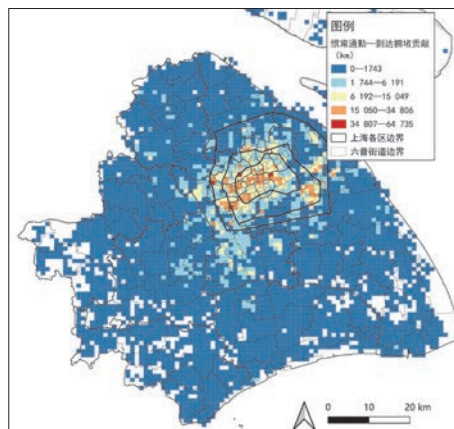
a 惯常通勤人群
图6 拥堵贡献的出发地分布

Fig.6 Origins of congested miles for regular commuters (left) and random non-commuters (right)



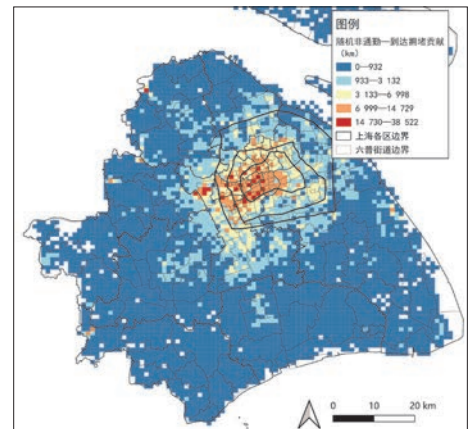
b 随机非通勤人群

资料来源:笔者自绘。



a 惯常通勤人群
图7 拥堵贡献的到达地分布

Fig.7 Destinations of congested miles for regular commuters (left) and random non-commuters (right)



b 随机非通勤人群

资料来源:笔者自绘。

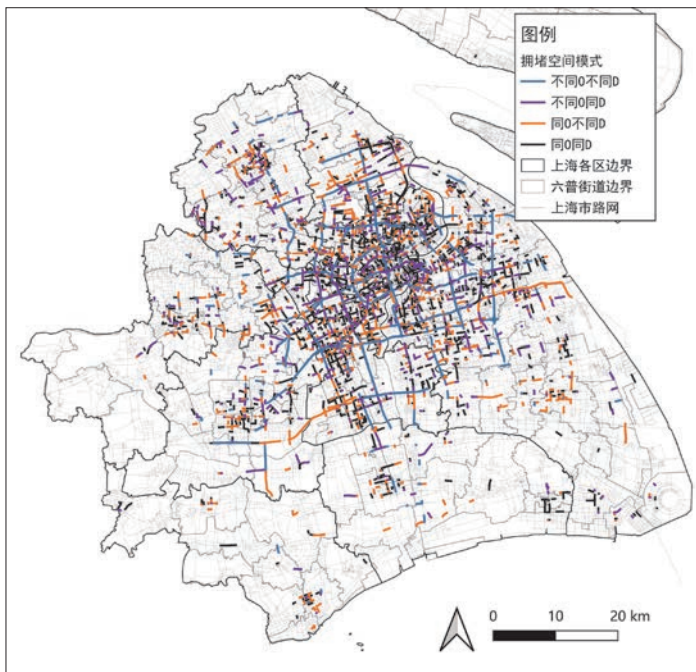


图8 常发拥堵空间模式的空间分布
Fig.8 Spatial distribution of congestion patterns by space

资料来源:笔者自绘。

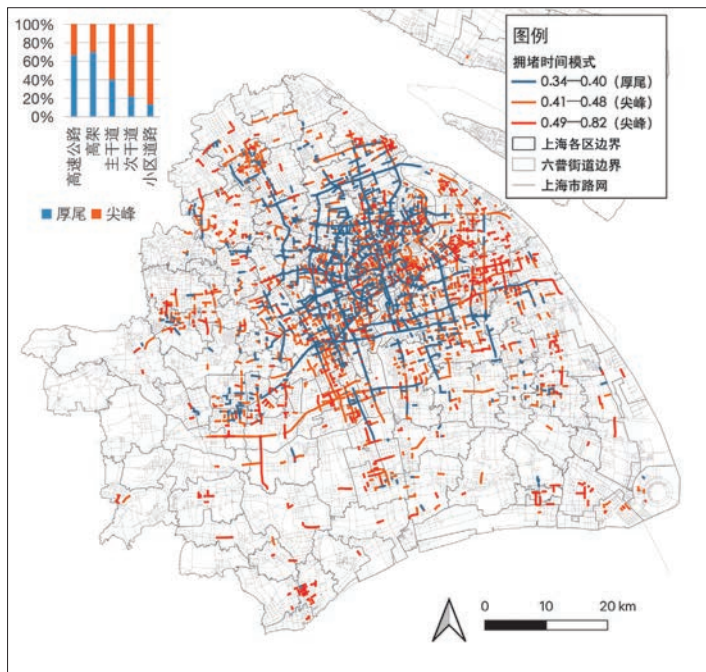
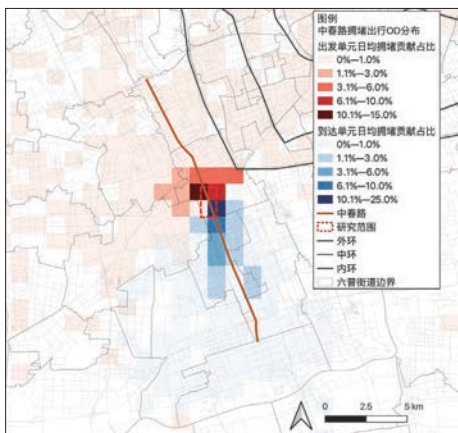


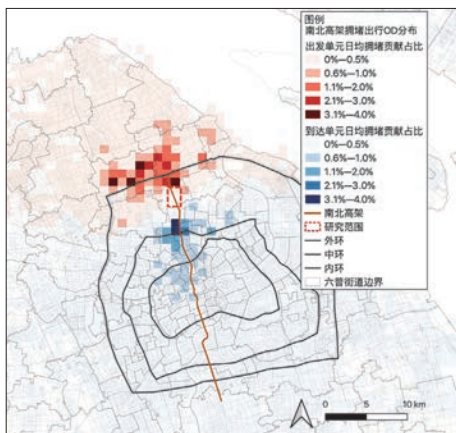
图10 常发拥堵时间模式的空间分布
Fig.10 Spatial distribution of congestion patterns by time

资料来源:笔者自绘。



a 中春路
图9 典型拥堵路段的拥堵出行OD分布图

Fig.9 OD Distribution of congested trips on typical congested sections of Zhongchun Road (left) and North-South Elevated Road (right)



b 南北高架

资料来源:笔者自绘。

道;同O同D型占33%,在空间邻近前二者且呈片状聚集、连续分布的特征,如莘庄—漕河泾、四川北路—北外滩、仙霞—金虹桥等居住—就业复合片区内;不同O不同D型占20%,主要分布于高速、高架等城市结构性通道上,如外环、中环、内环、南北高架、延安高架。可以看出,不同等级道路因其服务对象、交通功能的差异,在拥堵的空间组织逻辑上也有所不同。

为进一步说明拥堵溯源的空间解析方法的效果,本文以中春路和南北高架为例进行对比分析。南北高架、中春路分别是上海市内最重要的南北向快速路、闵行区重要南北向干道,均因拥堵问题突出^①而被频繁报道。从拥堵贡献的OD空间分布来看(见图9),中春路(莘松路—沁香路)段、南北

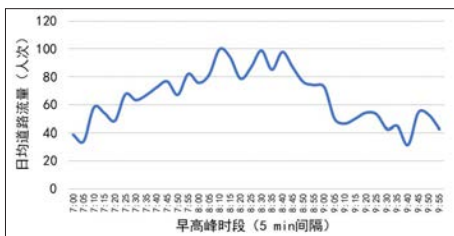
高架(呼兰路—共康路)段分别是典型的同O同D型、不同O不同D型常发拥堵路段。前者的拥堵出行在来源、去向空间上都较为集中,主要分布于莘庄镇和莘庄工业区内;后者的拥堵出行OD相对分散,遍布多个街道单元。

3.2 时间模式解析

基于拥堵时间集中度指标,识别出两种主要的拥堵时间模式(见图10)。61%的拥堵路段属于尖峰型,错峰调节潜力较大,主要分布于主次干道;相比之下,厚尾型则因早高峰期间流量保持相对稳定,调节难度相对更大,主要分布于高速、高架、主干道等高等级道路。总体呈现道路等级越高,尖峰型拥堵占比越低的特征。从空间分布上看,拥堵路段时间集中度普遍较高的板块主要有五个新城、陆家嘴、张江、金桥加工区、外高桥、友谊、月浦、马桥、颛桥等街道单元。

中春路(莘松路—沁香路)段是典型的尖峰型拥堵路段,其出行流量在高峰时段内(7:30—8:30)存在明显的波峰;而南北高架

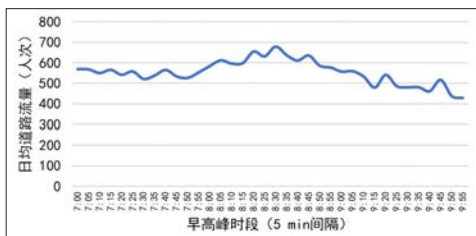
注释: ① 南北高架共和—鲁班段在工作日的日均拥堵达6 h,在上海市所有快速路的拥堵排行榜中位列第5;中春路莘庄段曾于2018年由四车道扩容为六车道,但时至2020年11月早高峰期间依然拥堵不断。



a 中春路

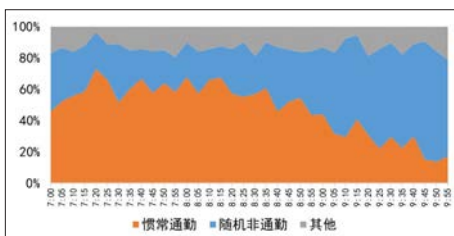
图11 典型拥堵路段的出行流量分布图

Fig.11 Distribution of travel flow on typical congested sections of Zhongchun Road (left) and North-South Elevated Road (right)



b 南北高架

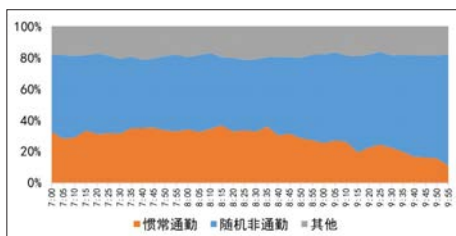
资料来源:笔者自绘。



a 中春路

图13 典型拥堵路段的各类人群占比图

Fig.13 Percentage of population groups on typical congested sections of Zhongchun Road (left) and North-South Elevated Road (right)



b 南北高架

资料来源:笔者自绘。

(呼兰路—共康路)段是典型的厚尾型拥堵路段,波峰不明显(见图11)。

占29%、52%、19%,由随机非通勤人群主导(见图13)。

3.3 行为模式解析

拥堵溯源的意义不仅在于揭示拥堵发生的时空逻辑,更在于识别关键的行为主体,从而因人而异地制定治理方案。基于人群特征指标,结果表明,62%的路段拥堵由惯常通勤人群主导,主要在外环内就业中心区、外环外大型居住区内的一般道路上密集成片分布(见图12),与图6、图7的惯常通勤人群拥堵贡献的主要OD分布特征相似;25%的路段拥堵由随机非通勤人群主导,主要分布在快速路(沪金高速、申嘉湖高速、外环、南北高架、沪闵高架等)上,交通枢纽片区(虹桥交通枢纽、浦东机场)内尤其明显。

中春路(莘松路—沁香路)段的拥堵出行中,惯常通勤人群、随机非通勤人群、其他人群各占51%、35%、14%,是典型的惯常通勤主导型拥堵路段,其中惯常通勤人群占比在高峰时段内达60%左右;而南北高架(呼兰路—共康路)段的拥堵出行中,上述各类人群分别

4 基于时空行为规划的缓堵应对策略

4.1 拥堵形成主要模式

为了提出缓堵应对策略,需要综合归纳拥堵路段的空间、时间、行为模式。因此,将3个维度的不同模式交叉分析,拥堵路段可以分为32种模式。一方面,从路段长度占比看,最高的4类分别是“尖峰—同O同D—惯常通勤主导”(以下简称“时空集中型”)、“尖峰—同O不同D—惯常通勤主导”(以下简称“出发集中型”)、“尖峰—不同O同D—惯常通勤主导”(以下简称“到达集中型”)、“厚尾—不同O不同D—随机非通勤主导”(以下简称“时空分散型”),各占23%、12%、9%、9%,合计54%,即这4类拥堵的时空行为模式可以解释早高峰大部分路段的拥堵成因。另一方面,从3个维度之间的关系出发同样可以归纳出这4种主要模式。图14中的桑基图表明,尖峰型拥堵通常与惯常通勤主导型拥堵相关联,且在此基础上根据空间特征的具体形式,演化出时空

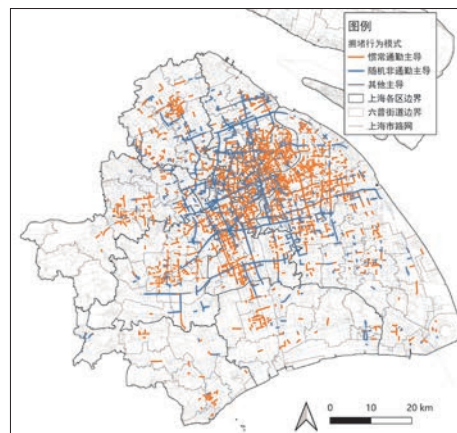


图12 常发拥堵行为模式的空间分布

Fig.12 Spatial distribution of congestion patterns by behavior

资料来源:笔者自绘。

集中型(同O同D)、出发集中型(同O不同D)、到达集中型(不同O同D)3种类型。其中,时空集中型可被认为是出发集中型、到达集中型的特殊形式,同时具备出发集中型、到达集中型的相关特征。厚尾型拥堵通常与不同O不同D型、随机非通勤主导型拥堵相关,定义为时空分散型。

从空间分布来看(见图15),出发集中型拥堵主要分布于中环外大型居住片区,如五个新城、川沙、莘庄等区域;到达集中型拥堵主要分布于中环内就业中心片区,如陆家嘴、徐家汇、漕河泾开发区、张江高科技园区、金桥出口加工区等区域;时空集中型拥堵则与出发集中型、到达集中型拥堵分布特征相似,主要在居住—就业复合片区内聚集成片分布;时空分散型拥堵主要分布于结构性交通廊道内的快速路上,如内环、中环、外环、南北高架、沪闵高架等。此外,快速路与一般道路的拥堵形成模式差异明显:高速公路、高架中分别有约85%、55%的拥堵路段属于时空分散型拥堵,即拥堵人群在空间、时间、行为上都呈现分散的特征;而一般道路中以集中型拥堵为主,其中时空集中型拥堵最多。

4.2 不同拥堵模式的规划应对策略

基于对拥堵时空行为模式的理解,可以针对性地制定缓堵对策,以提高时空行为规划的

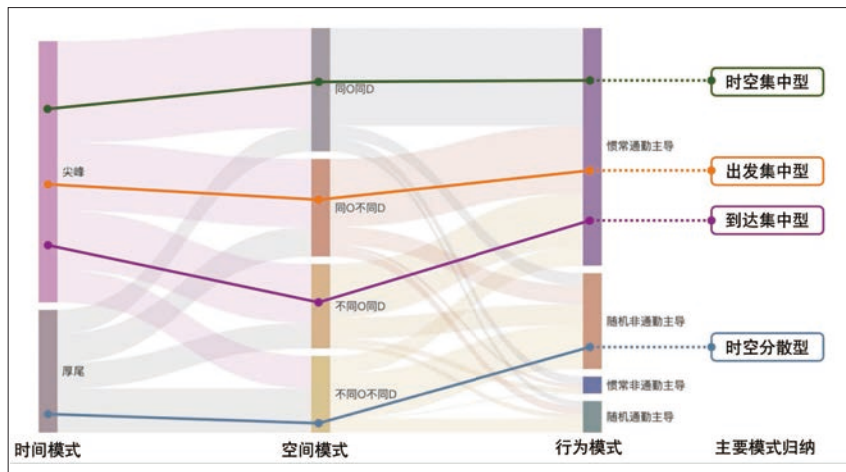


图14 拥堵时空行为模式桑基图
Fig.14 Congestion patterns Sankey diagram by space-time-behavior

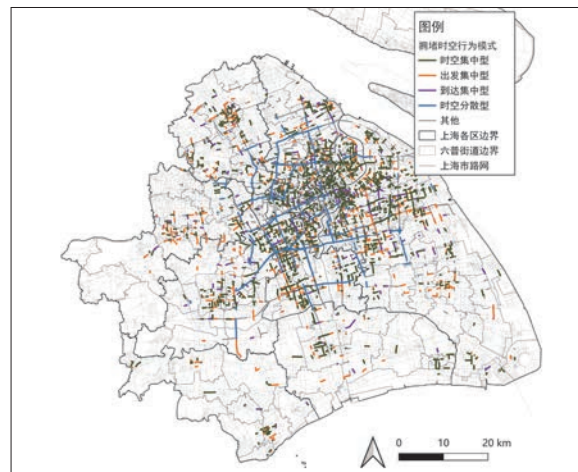


图15 常发拥堵时空行为模式的空间分布图
Fig.15 Spatial distribution of congestion patterns by space-time-behavior

资料来源: 笔者自绘。

资料来源: 笔者自绘。

可实施性: (1) 拥堵贡献的空间集中度越高, 对拥堵贡献的出发、到达空间进行干预的潜力越高, 越适合进行空间规划以实现源头管控; 如提升出发侧、到达侧的公共交通服务水平, 从而将部分道路出行需求转移到公共交通上。(2) 时间集中度越高, 表明越有可能通过时间规划管理措施来降低拥堵波峰; 如在出发侧拥堵源范围内实施预约出行策略、在到达侧拥堵源范围内调整上班时间表。(3) 惯常通勤人群因受到较强的时空约束, 宜采用“自上而下”的措施改变其出行选择, 而随机非通勤人群敏感性较低, 可通过引导使其优化自身出行行为。

因此, 对于4种主要拥堵模式, 根据其空间、时间、行为特征, 可以制定相应的规划策略(见表2)。对于出发集中型、到达集中型拥堵可以在空间规划层面分别实施居住、就业单元规划, 在时间规划层面实施预约出行、上班时间调整政策; 对于时空分散型拥堵由于拥堵出行流在时空上都比较分散, 空间规划、时间规划潜力较低, 可以通过提供智能出行建议、鼓励共享出行等行为规划措施引导随机非通勤人群改变出行行为。

与此同时, 高速公路、高架的拥堵具有不同O不同D、厚尾、随机非通勤人群主导的特征, 宜采取时空分散型拥堵的规划策略; 城市内部道路则呈现同O同D、尖峰、惯常通勤人群

表2 各类型拥堵模式的潜在缓堵策略

Tab.2 Potential mitigation strategies by congestion patterns

拥堵溯源类型	空间规划	时间规划	行为规划
出发集中型	居住单元规划、优化出发侧公交服务	预约出行、鼓励错峰出行	
到达集中型	就业单元规划、优化到达侧公交服务	上班时间调整、实施弹性工时制度	公共交通补贴、拥堵收费、远程办公
时空集中型	职住空间规划、设置通勤班车	出行预约、上班时间调整	
时空分散型	—	—	智能出行建议、实时信息推送、鼓励共享出行

资料来源: 笔者自制。

主导的特征, 宜采取集中型拥堵的策略。

地集中在就业中心片区, 而后的到达地分散在商业、娱乐、医疗、交通枢纽等。

5 总结与讨论

5.1 研究结论

本文从时空行为视角分析上海市早高峰拥堵的形成模式, 建立基于手机信令数据和交通态势数据的出行轨迹还原方法, 对拥堵进行溯源并归纳了拥堵形成的时空模式, 基于时空行为规划框架制定了缓堵应对策略, 为拥堵治理提供一定参考。

一方面, 刻画了上海市早高峰拥堵形成的特征: 空间特征方面, 拥堵的出发地沿内环、中环高架浦西段成片分布, 到达地在内环内集中分布; 时间特征方面, 8:00—8:30时段拥堵最为严重, 出发、到达高峰分别在8:00左右和8:30左右; 人群特征方面, 惯常通勤人群与随机非通勤人群拥堵贡献总量相近, 前者在时间上存在明显高峰, 人均拥堵贡献较低, 到达

另一方面, 解析了具体道路拥堵的时空行为模式: 空间上多数拥堵存在拥堵源且仅受到单一拥堵源的近距离影响; 时间上多数拥堵存在拥堵高峰, 呈现尖峰特征; 行为上多数拥堵由惯常通勤人群主导; 且快速路与一般道路在这3方面的特征差异明显。在此基础上, 归纳了出发集中型、到达集中型、时空集中型、时空分散型4类拥堵模式, 分别主要分布于大型居住片区、就业中心区、居住—就业复合片区、结构性交通廊道内。针对4种拥堵模式, 结合时空行为规划理论框架, 提出了潜在的缓堵应对策略。

5.2 讨论

展望未来, 个体出行在拥堵研究中成为一个越来越不可忽视的变量, 而从全过程的角

度分析个体出行对拥堵的具体时空影响,能够顺应上海市交通拥堵治理的精细化趋势。在实践方面,本文为拥堵治理提供以下参考:一是为城市交通体检提供普适性的数据与方法框架,手机信令数据与交通态势数据是各大城市都相对容易获得的高精度数据,为城市定位并追溯拥堵源头提供辅助;二是为精细化的拥堵治理提供切入点,以研究中的指标框架为基础可以构建全市范围内的拥堵分析可视化平台,从更大的时空尺度理解城市快速路和城市内部道路拥堵模式的差异性,并匹配适合的规划应对策略;三是为交通规划方案提供缓堵潜力评估,通过模拟规划方案减少拥堵贡献的总量与时空分布,为规划的科学性与可行性提供数据支撑。

本文在数据与方法上仍然存在一些局限。一是使用数据的局限性。由于手机信令数据的隐私保护限制,出行数据使用1 km网格进行统计,难以支持小尺度的空间分析。未来若使用汽车GPS等高精度数据进行分析,可以将拥堵出行溯源到地块甚至建筑尺度,以更精细地分析拥堵成因。二是分析方法的局限性。主要聚焦拥堵贡献人群的出行发生、道路拥堵、出行到达3个时刻的状态分析,尚未从多路段关联的视角讨论拥堵流的叠加、消散过程特征。三是研究范围的局限性。道路交通与公共交通、慢行交通共同构成出行系统,未来还可以将城市道路拥堵放到更大的体系进行整体考量,进一步讨论交通方式转换的规划应对策略与具体缓堵效应。

参考文献 References

- [1] HÄGERSTRAND T. What about people in regional science?[J]. Papers of the Regional Science Association, 1970, 24: 6-21.
- [2] 古杰,周素红,闫小培,等.居民日常出行时空集聚视角下的城市交通拥堵形成机制研究——以广州为例[J].地理科学,2012,32(8):921-927.
GU Jie, ZHOU Suhong, YAN Xiaopei, et al. Formation mechanism of traffic congestion in view of spatio-temporal agglomeration of residents' daily activities: a case study of Guangzhou[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(8): 921-927.
- [3] 张月朋,王德.上海市早高峰出行问题源头区识别[J].城市规划,2021,45(7):83-90.
ZHANG Yuepeng, WANG De. Identification of the source of morning peak-hour traffic congestion in Shanghai[J]. City Planning Review, 2021, 45(7): 83-90.
- [4] WANG J, WEI D, HE K, et al. Encapsulating urban traffic rhythms into road networks[J]. Scientific Reports, 2014, 4(1): 4141.
- [5] WANG P, HUNTER T, BAYEN A M, et al. Understanding road usage patterns in urban areas[J]. Scientific Reports, 2012, 2(1): 1001.
- [6] 王璞,鲁恒宇,谭倩,等.手机信令与出租车GPS数据融合车源定位方法[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(9):96-100.
WANG Pu, LU Hengyu, TAN Qian, et al. A data fusion approach for locating driver sources using mobile phone signaling data and taxi GPS data[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(9): 96-100.
- [7] 王德,胡杨.城市时空行为规划:概念、框架与展望[J].城市规划学刊,2022(1):44-50.
WANG De, HU Yang. Urban spatial-temporal activity planning: concept, framework and prospect[J]. Urban Planning Forum, 2022(1): 44-50.
- [8] 柴彦威,李彦熙,李春江.时空间行为规划:核心问题与规划手段[J].城市规划,2022,46(12):7-15.
CHAI Yanwei, LI Yanxi, LI Chunjiang. Spatiotemporal and behavioral planning: the key issue and planning strategies[J]. City Planning Review, 2022, 46(12): 7-15.
- [9] 柴彦威,塔娜.中国时空间行为研究进展[J].地理科学进展,2013,32(9):1362-1373.
CHAI Yanwei, TA Na. Progress in space-time behavior research in China[J]. Progress in Geography, 2013, 32(9): 1362-1373.
- [10] TURNBULL K, LEVINSON H, PRATT R, et al. Traveler response to transportation system changes[M]. Washington, DC: Transportation Research Board, 2006: 220-333.
- [11] 柴彦威,申悦,陈梓烽.基于时空间行为的人本导向的智慧城市规划与管理[J].国际城市规划,2014,29(6):31-37.
CHAI Yanwei, SHEN Yue, CHEN Zifeng. Towards smarter cities: human-oriented urban planning and management based on space-time behavior research[J]. Urban Planning International, 2014, 29(6): 31-37.
- [12] DELAFONTAINE M, NEUTENS T, SCHWANEN T, et al. The impact of opening hours on the equity of individual space-time accessibility[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2011, 35(4): 276-288.
- [13] HENCKEL D, THOMAIER S. Efficiency, temporal justice, and the rhythm of cities[M]//HENCKEL D, THOMAIER S, KÖNECKE B, et al. Space-time design of the public city. Dordrecht: Springer, 2013: 99-117.
- [14] SHAO Y, ZHANG C, WANG D, et al. Optimizing the subsidy calculation model of urban public transport[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021: e5536801.
- [15] WU K, CHEN Y, MA J, et al. Traffic and emissions impact of congestion charging in the central Beijing urban area: a simulation analysis[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 51: 203-215.
- [16] LOO B P Y, HUANG Z. Spatio-temporal variations of traffic congestion under work from home (WFH) arrangements: lessons learned from COVID-19[J]. Cities, 2022, 124: 103610.
- [17] MARTIN E, SHAHEEN S A, LIDICKER J. Impact of carsharing on household vehicle holdings: results from North American shared-use vehicle survey[J]. Transportation Research Record, 2010, 2143(1): 150-158.
- [18] SALEEM M, VÄSTBERG O B, KARLSTRÖM A. An activity based demand model for large scale simulations[J]. Procedia Computer Science, 2018, 130: 920-925.
- [19] 陈子浩,胡杨,王德,等.欧洲城市时间政策的主要议题及相应实践[J].城市发展研究,2022,29(11):89-96.
CHEN Zihao, HU Yang, WANG De, et al. Main topics and corresponding practices of European urban time policies[J]. Urban Development Studies, 2022, 29(11): 89-96.
- [20] 郭继孚,刁晶晶,绿凯,等.预约出行模式展望[J].交通运输系统工程与信息,2021,21(5):160-164.
GUO Jifu, DIAO Jingjing, XIAN Kai, et al. A prospect of reserved transportation[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(5): 160-164.
- [21] 朱永中,宗刚.时间价值偏好下北京交通拥堵收费设计研究[J].中国软科学,2014(9):67-77.
ZHU Yongzhong, ZONG Gang. The design of Beijing congestion charge under value of time[J]. China Soft Science, 2014(9): 67-77.
- [22] CHANG D M, DRESSER G B. A comparison of traffic assignment techniques[R]. 1990.