

# 暴雨内涝影响下的城市道路交通拥挤特征识别

胡文燕<sup>1,2</sup>, 李梦雅<sup>1,2</sup>, 王 军<sup>1,2\*</sup>, 黄清雨<sup>1,2</sup>

(1. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241; 2. 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241)

**摘要:**近年来,暴雨内涝频繁发生,常引发严重的城市交通拥堵问题。本文利用自主开发的宏观交通模拟工具,模拟了上海市中心城区50年一遇和100年一遇暴雨强度情景下每条路段的小时交通量,通过计算道路饱和度,研究了不同强度暴雨内涝对中心城区高架出入口和重要道路拥挤程度的影响。结果表明:①100年一遇暴雨内涝对上海市中心城区道路交通服务能力影响显著,可导致7个高架道路出入口关闭,部分出入口严重拥堵;②暴雨内涝对道路拥堵状况影响的差异性明显,变拥挤路段占道路总里程的13.35%,其中一级道路的拥挤程度变化最为明显,如:大连路、武宁路,周家嘴路和长寿路等主要路段服务水平下降。

**关键词:**交通模拟;暴雨内涝;道路网络;饱和度;上海市

## 1 引言

城市暴雨内涝是指发生在短时间内的集中降水,致使城市内产生积水灾害及相关次生灾害的现象(刘家宏等,2015)。城市交通系统作为承载客货运输及市民出行活动的主要载体,其通畅程度极易受到灾害性天气的影响。城市暴雨强度大,时间集中,往往让交通管理部门和出行者猝不及防,所以极端降雨天气诱发的道路拥堵已成为城市交通管理不可回避的难题。从北京、上海、纽约、伦敦等特大城市所遭受暴雨内涝的影响来看,严重的暴雨内涝会导致交通系统瘫痪,引发诸多交通事故甚至人员伤亡。例如,2012年7月21日,北京市发生特大暴雨,全市平均降水量达170 mm,90余条道路因为严重积水而中断,并且造成了77人死亡,经济损失上百亿元;2013年9月13日下午,一场百年一遇暴雨袭击上海,致使市区80多条道路严重积水,由于短时强降水正值交通高峰时段,故而造成诸多交通

线路瘫痪,对市民出行造成了严重影响。因此,暴雨内涝所导致的交通拥堵问题已成为当前城市研究的热点问题。

目前,暴雨内涝对交通影响的研究主要涉及宏观和微观2个方面。在微观尺度的交通模型主要考虑道路、车辆、出行者的细节。如Su等(2016)研究了司机在雨天的驾驶行为,并利用车辆跟驰模型和道路交通模型(SUMO)对北京若干主干道路上的交通拥堵进行了模拟。宏观尺度的交通模型主要将车辆视为流体,研究行驶时间、行驶路径、车流量和密度等。如Tsapakis等(2013)研究了不同暴雨情景(小雨、中雨、大雨)对早中晚不同时间段内的旅行时间影响,结果表明暴雨将导致旅行时间被延长;Mitsakis等(2014)研究了暴雨对交通延误的影响,结果表明暴雨内涝会严重影响城市交通系统,导致车辆路径改变,造成出行时间被延长。以上研究表明,降雨对于城市交通的影响十分显著,但尚存在两方面不足:一是没有明确降雨强度并且降雨强度较小,但是暴雨的突发性、偶然性强,所造成的影响更

收稿日期:2017-07-18;修订日期:2018-01-10。

基金项目:国家自然科学基金项目(51761135024, 41671095, 71373084) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.51761135024, No.41671095, No.71373084]。

作者简介:胡文燕(1993-),女,天津人,硕士生,主要从事城市灾害风险研究,E-mail: huwenyan1121@163.com。

通讯作者:王军(1975-),男,陕西人,博士,教授,博士生导师,主要从事城市自然地理与灾害风险研究等,E-mail: jwang@geo.ecnu.edu.cn。

引用格式:胡文燕,李梦雅,王军,等.2018.暴雨内涝影响下的城市道路交通拥挤特征识别[J].地理科学进展,37(6):772-780.[Hu W Y, Li M Y, Wang J, et al. 2018. Urban traffic congestion caused by rainstorms and inundation[J]. Progress in Geography, 37(6): 772-780.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.06.004

加严重；二是目前研究只着眼于一条或几条主干道的街区尺度，不能很好地代表整个网络中的交通特征。本文通过宏观交通模拟方法将不同强度的暴雨情景与城市道路网络相结合，识别城市尺度暴雨内涝情景下交通的拥挤程度。

本文以上海市中心城区为研究区，基于自主开发的交通模拟工具，将所有车辆视为流体，研究车流量、道路通行能力、道路速度等特性，进而计算不同暴雨重现期下道路的饱和度，以反映城市交通的拥挤程度，研究成果可为交通管理部门以及个人出行提供科学的指导和参考。

## 2 研究区概况与数据预处理

### 2.1 研究区概况

本文研究区为上海市中心城区内环快速路以内区域(图 1)。该区域总面积约为 120 km<sup>2</sup>，海拔约 3.0~3.5 m，区域排涝能力较弱，受暴雨内涝影响频繁。该区域社会经济活跃，交通网络密集，道路类型复杂，已形成了以快速路和主干道路为骨架的城市道路网络。近年来，该区域居民出行量日益增加，交通供需不平衡问题突出，尤其是在早晚高峰时段和灾害性天气条件下，道路的服务水平下降明显。

### 2.2 暴雨内涝数据

本文使用了研究团队开发的《城市暴雨内涝灾害危险性模拟工具》来构建暴雨内涝危险性情景(董军刚, 2014; 黄清雨等, 2016; Huang et al, 2017; 费茉莉等, 2017)。该工具采用上海暴雨强度公式和芝加哥雨型计算特定情景的降雨过程，公式

如下：

$$i = \frac{a}{(t+b)^c} \tag{1}$$

式中： $i$ 为降雨强度； $t$ 为降雨历时； $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为暴雨公式参数。

其次，采用适合上海地区的SCS-CN降雨径流模型，进行暴雨内涝产流模拟，公式如下：

$$Q = \frac{(P - 0.05S')^2}{(P + 0.95S')}, P > 0.05S' \tag{2}$$

$$Q = 0, P \leq 0.05S'$$

式中： $P$ 为降雨量； $Q$ 为净雨量，即径流量； $S'$ 为流域饱和储水量。

因不易直接获得 $S'$ ，故引入Curve Number(CN)参数，公式如下：

$$S' = \frac{25400}{CN} - 254 \tag{3}$$

式中： $CN$ 值是无量纲参数，与土壤质地、土地利用方式和降雨前土壤湿润状况有关。

接下来，使用水动力模型对内涝汇流进行模拟，描述暴雨内涝汇流过程的圣维南方程组由连续方程和动量方程组成，公式如下：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = r_e \tag{4}$$

式中： $h$ 为内涝积水深度； $t$ 为时间； $Q_x$ 、 $Q_y$ 分别为 $x$ 、 $y$ 方向上的单宽流量； $r_e$ 为暴雨产流。

动量方程公式为：

$$\begin{cases} x \text{方向: } \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g(S_{0x} - S_{fx} - \frac{\partial h}{\partial x}) \\ y \text{方向: } \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = g(S_{0y} - S_{fy} - \frac{\partial h}{\partial y}) \end{cases} \tag{5}$$

式中： $u$ 、 $v$ 为 $x$ 、 $y$ 方向上的平均流速； $g$ 为重力加速

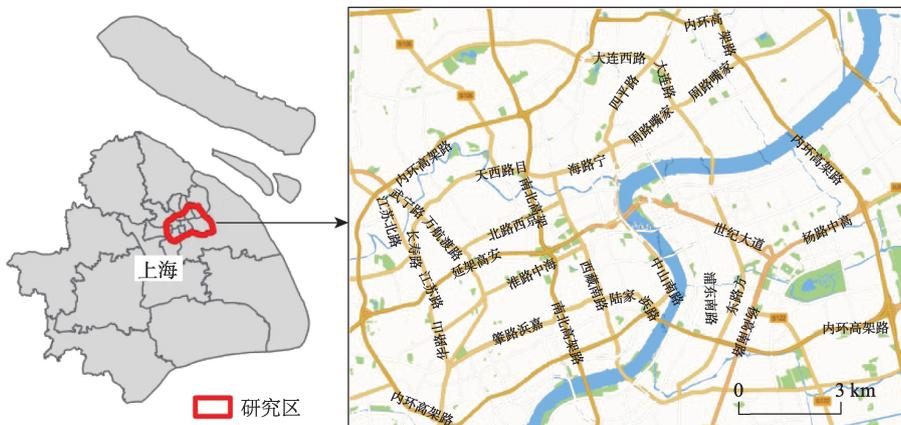


图1 研究区地理位置

Fig.1 Location of study area

度;  $S_{0x}$ 、 $S_{0y}$  为  $x$ 、 $y$  方向上的坡度比降;  $S_{fx}$ 、 $S_{fy}$  为  $x$ 、 $y$  方向上的摩阻比降。

利用该工具, 本文以 2012 年为目标年份, 获得了上海市中心城区遭遇 50 年和 100 年一遇强降雨时的最大积水信息。

### 2.3 道路网络数据

城市道路网络是车辆行驶的载体, 所以道路数据是交通模拟的基础。上海市中心城区道路情况复杂, 单行路居多, 并且外围和内部穿插着高架道路, 交通流量大, 车速情况复杂。在交通模拟过程中, 每一辆车都需要按照一定规则在道路上行驶, 其中道路的等级、车道数量等都会影响车辆的行驶状态, 所以要完善道路信息, 包括: 道路名称、道路等级、路段编码、车道数量、路段长度、单双行和道路车速。

本文根据 OpenStreetMap 将研究区道路分为 5 类: 快速路、主干道路、一级道路、二级道路、支路。根据道路的等级, 确定每条路段的车道数量和车辆限速(陈小鸿, 2004)。但在真实情况下, 车辆不可能以限定车速行驶, 所以应对行驶时间进行必要的校正。高德地图作为中国应用最广的数字地图导航和位置服务平台之一, 具有强大的路径搜索功能, 并且路径规划考虑了实际路况, 为用户的出行提供了接近真实情况的指导。为此, 选取了 1000 对起始地(O)和目的地(D), 使用高德地图的行驶时间对模拟的行驶时间进行了校正, 结果表明, 模拟的行驶时间和高德地图提供的行驶时间的线性关系良好(图 2)。因此, 本文根据行驶时间的线性拟合得到的公式, 对速度进行校正, 公式为:

$$V = V_0 / 2.162 \tag{6}$$

式中:  $V$  为校正后的速度;  $V_0$  为限速。结果如表 1 所示。

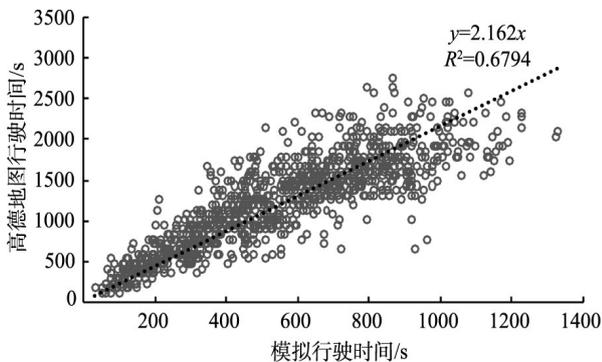


图 2 模拟行驶时间与高德地图行驶时间的关系

Fig.2 The relationship of the travel time based on traffic simulation and the real travel time based on Amap

为模拟在暴雨天气下的交通情况, 还需对道路网络数据和暴雨内涝信息进行整合。小客车排气筒离地高度约为 25~35 cm, 一旦积水深度超过此高度, 极易导致车辆熄火(Yin et al, 2017); 中国部分城市排水防涝应急响应(如北京市、河北省等)也有规定, 当道路积水深度超过 30 cm 时, 应及时设立警示标志, 提醒车辆和行人谨慎通行, 甚至进行必要的交通管制, 封闭该路段(黄清雨, 2017)。本文利用 ArcGIS 软件将不同暴雨重现期下的最大积水深度图与研究区的路网数据进行叠加, 删除积水深度大于 30 cm 的路段(图 3), 为后续交通模拟做好准备。需要说明的是, 由于 50 年和 100 年一遇强降雨较少见, 交通影响数据较难收集, 研究仅针对 10 年一遇的暴雨进行了车流量验证, 结果较为可靠(黄清雨, 2017)。

## 3 城市道路交通模拟方法

### 3.1 出行量预测与分布

由于城市内部不同区域的经济水平和发展功能定位不同, 因此, 不同区域居民的出行特征也不相同, 表现出各交通小区之间的出行分布有所差别。本文根据《上海市综合交通年度报告(2015 年)》中的上海市小客车出行分布图(图 4), 将研究区根据交通干道分为 6 个交通小区。交通小区之间的出行量根据上海市小客车出行量分布图按比例设计, 从而得到区域之间的出行量特征比例表(表 2)。

根据《上海市综合交通年度报告(2015 年)》中提供的分区域交通统计数据 and 机动车占比, 对研究区内的机动车出行量进行了估算, 并通过多次试验, 最终模拟了 48500 对起始地(O)和目的地(D)的路径。为反映不同时段的交通量, 每对 OD 点分别代表 0.75、1.00、1.25、1.50、1.75、2.00、2.25 和 2.50 pcu (passenger car unit)。根据研究表明, 由于极端天气影响而导致平均工作日交通活动的变化不超过 3% (Hassan et al, 1999), 所以本文忽略了出行量受极端天气的影响, 即暴雨情景与晴天情景的出行量相

表 1 道路类型的限速与校正后车速

Tab.1 The limiting-velocity and the calibrated velocity of different road types

	快速路/ (m/s)	主干道路/ (m/s)	一级道路/ (m/s)	二级道路/ (m/s)	支路/ (m/s)
道路限速	22.22	16.67	13.89	11.11	8.33
校正车速	10.27	7.71	6.42	5.14	3.85

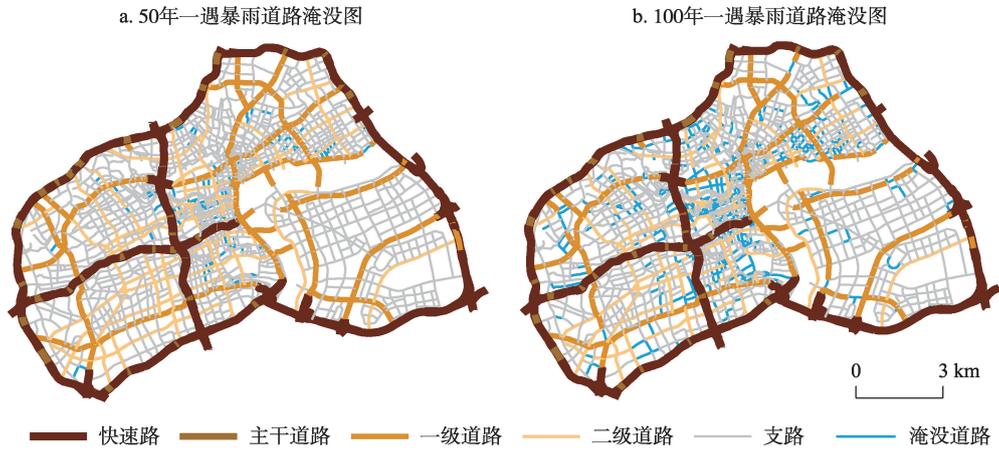


图3 各重现期下道路淹没图

Fig.3 Simulated flooded roads caused by rainfall of 50-year and 100-year return periods

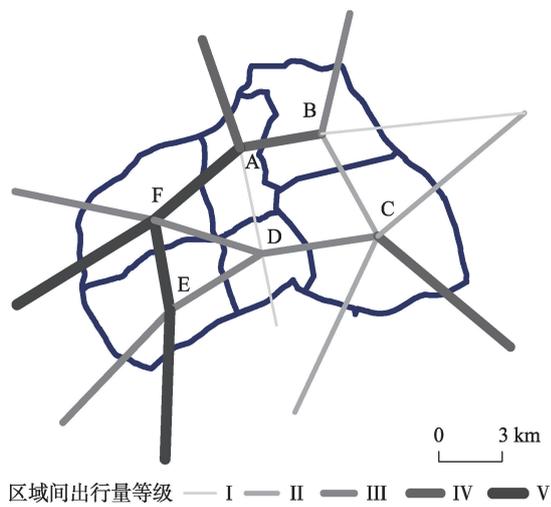


图4 上海市小客车区域间出行量等级图<sup>①</sup>

Fig.4 Travel volume grade of car trips between distinct regions in Shanghai

表2 区域间出行量占总出行量百分比表/%  
Tab.2 The proportion of the travel volume between distinct regions/%

	A	B	C	D	E	F	OUT
A	1.12	2.23	1.40	0.56	1.96	2.79	2.23
B	2.23	1.12	1.12	1.40	1.96	2.23	2.23
C	1.40	1.12	1.12	1.68	1.68	1.68	5.03
D	0.56	1.40	1.68	1.12	1.68	1.68	0.56
E	1.96	1.96	1.68	1.68	1.12	2.79	5.03
F	2.79	2.23	1.68	1.68	2.79	1.12	4.47
OUT	2.23	2.23	5.03	0.56	4.47	4.47	1.12

同。为消除研究单元粒度效应的影响,本文采用位置明确的出发地和目的地点数据,而非交通分析小

区来表征研究区内部的出行分布。出发地和目的地根据蒙特卡洛模拟方法进行随机配对(Hu et al, 2015),所有车辆在1小时的模拟时间内以校正后的自由流车速随机出发。

### 3.2 寻径算法设计

寻找最短路径问题是图论中寻找两点间最短路径的经典问题。本文中,最短路径算法主要用于计算车辆路径。在日常研究中,最短路径指空间距离上的最短、时间最短、费用最小或容量最小等。每种最短路径算法在应用范围、时间复杂度和空间复杂度等方面各有特色(陆锋, 2001)。城市道路网络相比于一般的图,具有一定的特殊性,如:道路网络是稀疏图,与同一个节点所连接的边的数量一般不超过5;道路网络具有层次性,快速路比一般道路重要(张波良等, 2014)。当起终点距离比较近的时候,驾驶者往往只考虑时间最短而忽略道路等级高低;但当起终点距离较远时,驾驶者更倾向于按照道路层次优先原则出行。由于研究区的路网复杂多样,为准确地刻画驾驶员的一般行为,本文以时间为路径权重,选择基于道路等级的堆优化Dijkstra算法寻找路径(图5)。考虑道路层次的路径规划任务主要分解为2步:第一步在主要路网上进行路径计算,路径计算结果只包含主干道信息;第二步在次要道路网上完成路径计算,路径计算结果为从起终点到达主干道的最短路径(张林, 2008)。为实现上述路径搜索目的,必须对路网进行分级处理,本文根据道路等级将道路分为2类(L1, L2):快速

① A-F为交通小区名称。等级I为该区域间的出行量占总出行量的0.56%;等级II为该区域间的出行量占总出行量的1.12%;等级III为该区域间的出行量占总出行量的1.68%;等级IV为该区域间的出行量占总出行量的2.23%;等级V为该区域间的出行量占总出行量的2.79%。

路、主干道路和一级道路为L1,二级道路和次干道路为L2。为计算从起终点到达主干道最短路径,还要将节点进行分类,建立网络拓扑,L1路段与L1路段相交的节点类别为1,L1路段与L2路段相交的节点类别为2,L2与L2路段相交的节点类别为3。

### 3.3 模拟结果验证分析

#### (1) 行驶里程、速度、时间验证

在道路数据预处理过程中,为保证模拟结果符合真实情况,我们将车速进行了校准。为验证交通模拟中的车辆行驶里程、速度、时间,本文选择晴天情景下的1000条路径,以路径的起点和终点作为出发地和目的地,在高德地图中搜索对应的路径,并记录搜索结果,包括路径长度和行驶里程(黄清雨,2017)。高德地图一次给出的参考路径往往有多条,本文仅选择与模拟结果最接近的路径,将其与晴天情况下交通模拟所得到的行驶里程、速度、时间进行对比,结果表明(表3):校正后的行驶里程、速度、时间较为可靠,符合实际情况。

#### (2) 晴天重要路口车流量模拟结果验证

为检验城市交通模拟的结果,本文选用《上海市综合交通年度报告(2015年)》中的地面道路工作

日时变特征和交叉路口高峰小时流量,对研究区内11个重要交通路口进行验证。对比了研究区11个路口(长宁路/江苏路、江苏路/延安西路、成都北路/北京西路、四平路/大连路、四平路/曲阳路、江宁路/长寿路、恒丰路/天目西路、西藏北路/海宁路、河南北路/海宁路、大连路/周家嘴路、成都北路/延安中路)模拟交通流量总量与晴天情景下实际交通流总量,发现每对OD点代表0.75、1.25、1.75、2.00和2.50 pcu(passenger car unit)分别对应工作日的6:00、22:00、12:00、10:00或16:00、8:00或18:00(表4)。本文重点研究暴雨内涝对高峰小时流量的影响,即每对OD点代表2.5 pcu,研究区内总交通量为121250 pcu,经过与实际晴天情景下的高峰小时流量对比验证, $R^2=0.6325$ ,线性关系良好(图6),也说明本文的城市宏观交通模拟方式较为可靠。

## 4 道路拥堵程度分类与分析

### 4.1 道路拥堵程度分类

由于暴雨内涝造成部分道路积水甚至被关闭,使得其他部分道路的交通承载压力增加,会导致大部分道路变得拥堵,所以研究道路的拥堵程度变得至关重要。交通拥堵是指交通需求超过某条道路的交通容量时,部分交通滞留在道路上的一种交通现象(郭泽斌等,2013)。拥挤程度的划分受到多种因素影响,所以在评价过程中十分困难。本文在宏

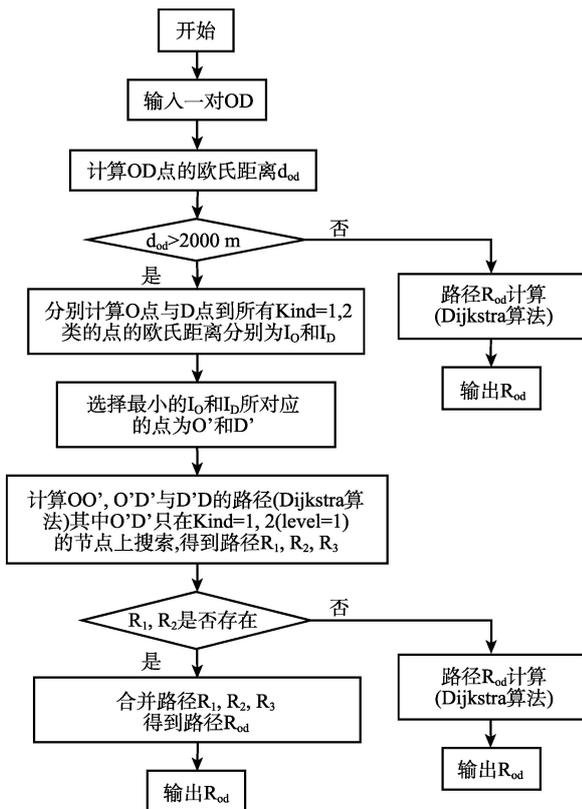


图5 基于道路等级的Dijkstra算法寻找路径流程图  
Fig.5 Flow diagram of Dijkstra-routing algorithm based on road levels

表3 基于高德地图的实际车速与模拟行驶里程、车速、时间对比

Tab.3 The comparison of traveled distance, traveled time and traveled speed based on Amap

	行驶路程/m	行驶时间/s	行驶速度/(m/s)
高德地图_平均值	8236.17	1255.77	6.56
模拟_平均值	9021.22	1187.65	7.60

表4 晴天情景下实际与模拟道路路口交通量对比

Tab.4 The comparison of the real turning traffic volume and simulated turning traffic volume under sunny scenario

时间	验证路口模拟小时交通总量/pcu	验证路口实际小时交通总量/pcu
6:00	16369	11104
8:00	54570	56445
10:00	43660	43490
12:00	38197	37938
16:00	43660	43490
18:00	54570	56445
22:00	27282	27760

观尺度上研究交通的拥堵程度,所以使用饱和度的数值作为评价道路拥挤程度的指标。饱和度( $V/C$ )的值主要取决于2个方面:交通量( $V$ )与通行能力( $C$ )。

中国一般根据饱和度值将道路拥挤程度、服务水平分为以下4个等级(沈颖等, 2007):①一级服务水平: $0 \leq V/C < 0.6$ ,道路交通顺畅、服务水平好;②

二级服务水平: $0.6 \leq V/C < 0.8$ ,道路稍有拥堵,服务水平较高;③三级服务水平: $0.8 \leq V/C < 1.0$ ,道路拥堵,服务水平较差;④四级服务水平: $V/C > 1.0$ ,道路严重拥堵,服务水平极差。本文交通量和通行能力所在的时间段统一为小时交通量。通过对不同情景下的交通模拟得到高峰时期的交通量;再根据《城市道路设计规范(CJJ37-2012)》得到每一条路段的通行能力;最后计算每一条路段的饱和度值,并根据以上标准进行分类(图7)。

### 4.2 道路拥堵程度分析

#### 4.2.1 暴雨天气对高架出入口拥堵程度的影响

随着城市交通网络的不断扩张,高架道路已成为许多城市的交通大动脉。极端降雨对高架道路交通会产生一定影响,使高架道路交通系统在暴雨天气下瘫痪,尤其是在高架道路出入口处,由于车道少并且车流量大,更易发生拥堵(王笑, 2015)。如图8所示,研究区内共有106个高架出入口,其中内

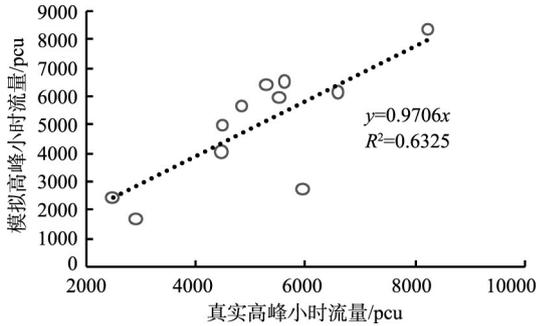


图6 研究区11个路口实际与模拟高峰小时流量关系图  
Fig.6 The real and simulated flow of meteors per hour based 11 turnings in the rush hour

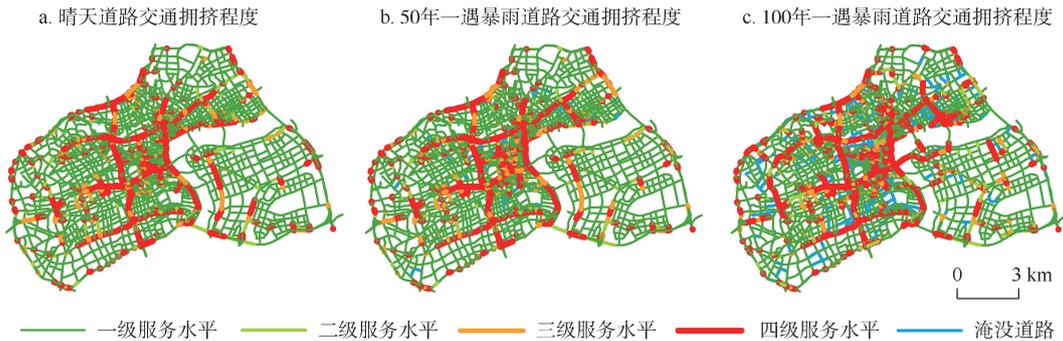


图7 各重现期情景下道路交通拥挤程度  
Fig.7 Traffic congestion level under different rainfall scenarios

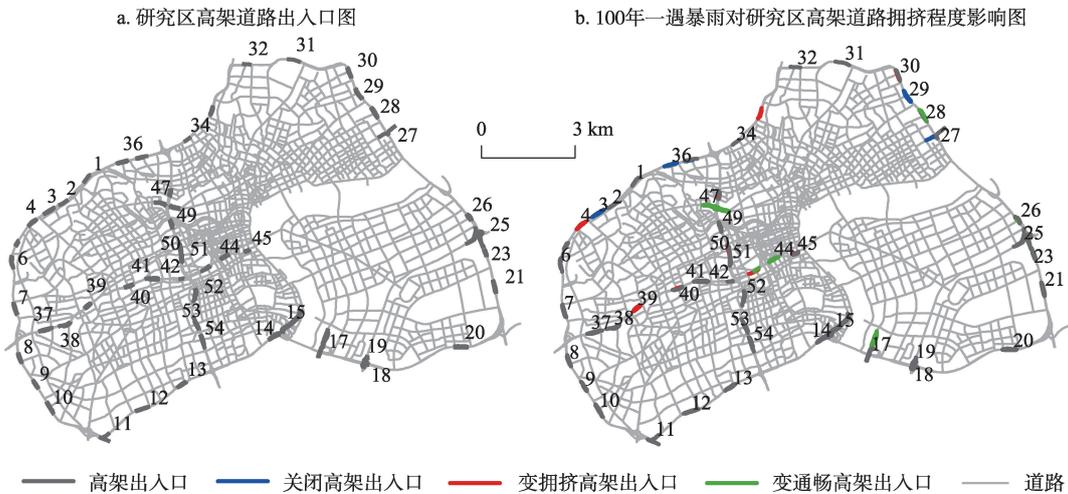


图8 研究区内高架道路出入口及受100年一遇暴雨影响图  
Fig.8 The exit and entrance of expressway and it caused by 100-year rainfall scenarios in study areas

环高架出入口多达67个,且受暴雨内涝影响最为严重。根据研究区高架出入口特点,分析50年一遇和100年一遇暴雨重现期下的道路积水情况,发现50年一遇暴雨对高架出入口的影响较小,但是100年一遇暴雨会造成超过10%的内环高架出入口的积水超过30 cm,导致7个路段关闭(出入口3、入口27、出入口29、出口35、入口36)。故本文主要分析百年一遇的暴雨天气对高架道路出入口交通流量特性的影响。

对比晴天和百年一遇降雨天气下高架道路出入口的饱和度变化,发现百年一遇降雨天气下部分出入口的饱和度有所增加,即道路服务能力降低;而部分出入口的饱和度却有所降低,即道路服务能力增加(表5)。由表5可以看出,一些出入口的关闭可能会导致邻近出入口的车流量增加,使得部分路

段变得拥堵,如出入口3和出口35、入口36的关闭,由于其他出入口要对其进行分流,会增加出入口4和出入口33的承载能力,使其服务能力下降。此外,延安高架和南北高架交口处的高架出入口饱和度变化明显,由于黄浦区老城区的地势低平,对洪涝的响应能力较差,暴雨情景下多路段积水,导致地面交通无法通行,所以高架的承载能力将会增加,致使出口43、入口50的饱和度增加。

#### 4.2.2 暴雨天气对主要道路拥堵程度的影响

暴雨内涝除对高架道路的出入口造成直接影响外,也会对城市的地面层的主要道路造成一定影响。本文将不同暴雨强度情景下与晴天情景下的各个等级道路的拥挤程度进行对比,将饱和度差值大于0.2和小于-0.2的路段作为变拥挤的路段和变通畅的路段。由图9可以看出,50年一遇的暴雨对

表5 高架道路出入口拥堵程度变化表

Tab.5 The change of the congestion level of the exit and entrance of expressway

出入口 代号	变拥堵的高架出入口		出入口 代号	变顺畅的高架出入口	
	晴天饱和度	100年一遇暴雨饱和度		晴天饱和度	100年一遇暴雨饱和度
入口4	0.13	1.11	入口16	0.38	0.13
入口30	0.69	0.91	入口43	1.83	1.58
入口33	1.77	2.31	入口44	0.56	0.36
入口39	1.44	1.92	入口47	1.73	1.19
入口46	2.19	2.94	入口48	1.16	0.93
入口50	1.11	1.44	出口16	0.40	0.12
出口4	0.05	0.46	出口23	2.68	0.00
出口33	0.59	0.95	出口28	0.55	0.34
出口39	2.12	2.41	出口44	0.77	0.32
出口40	2.13	2.51	出口47	1.31	0.60
出口43	0.40	0.65	出口48	1.47	1.19

a. 50年一遇暴雨导致道路拥挤程度变化图

b. 100年一遇暴雨导致道路拥挤程度变化图

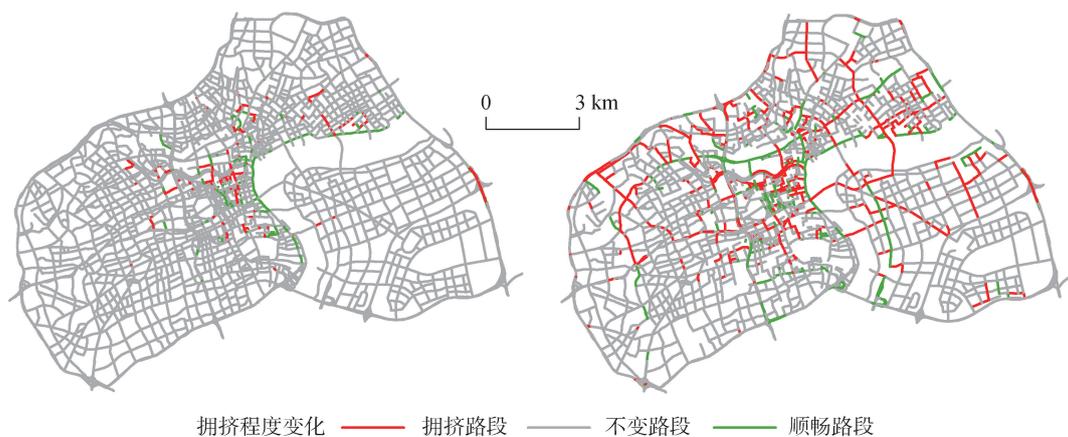


图9 道路拥堵情况变化图

Fig.9 The change of the traffic congestion level

道路拥挤程度的影响较小,主要集中在地势低洼的黄浦区北部区域,但是百年一遇的暴雨会导致道路网络整体的服务能力下降,变拥挤和变通畅的路段占道路总里程的百分比分别为13.35%和7.20%。其中,变拥挤和变通畅的主干道路占总主干道路里程的百分比分别为5.42%和4.95%;变拥挤和变通畅的一级道路占总一级道路里程的百分比分别为23.31%和33.12%;变拥挤和变通畅的二级道路占总二级道路里程的百分比分别为16.96%和4.69%;变拥挤和变通畅的支路占总支路里程的百分比分别为13.11%和2.78%。根据司机驾驶特点,司机车辆驾驶过程中一般会选等级高的道路,所以晴天情景下主干道路和一级道路的拥挤现象最严重。遇到极端降雨时,由于高架道路可进行一部分的车辆分流,所以主干道路只有部分路段的拥挤程度发生变化,如成都北路的北段和中段服务能力下降,延安东路中段服务能力上升;但一级道路的拥挤程度变化十分明显,如大连路、武宁路、周家嘴路和长寿路等部分路段会变得明显拥堵,陆家浜路、四平路和杨树浦路等部分路段却会变得顺畅。

## 5 结论与讨论

(1) 针对城市道路网络的特点,建立了不同暴雨情景下的城市宏观交通模拟方法,包括道路信息整合,出行量预测与分布和寻径算法设计3部分。根据城市暴雨内涝模拟的最大水深结果整合道路网络信息,通过上海市小客车出行分布图合理分配OD点,采用Dijkstra算法搜索路径;通过城市交通模拟得到不同暴雨强度下每条路段的车流量,并对晴天情境下的车流量、速度等结果进行了验证;根据每条路段的车流量计算了道路的饱和度,进而识别了城市道路网络的拥挤程度。

(2) 本文分析了不同重现期的暴雨内涝对城市道路拥挤程度的影响,结果表明:50年一遇的暴雨内涝对研究区内的道路影响程度不大,但是100年一遇的暴雨内涝对城市快速路出入口、主干路的影响十分明显,导致内环高架大于10%的出入口关闭,部分出入口严重拥堵;另外,100年一遇的暴雨内涝对一些重要道路的影响也十分显著,变拥挤的路段占道路总里程的百分比为13.35%,其中,一级道路的拥挤程度变化最为明显,变拥挤的一级道路占一级道路总里程的百分比为23.31%。

(3) 本文虽然实现了城市尺度上的道路交通模

拟,并进一步计算了道路拥挤程度,但对因拥挤程度变化所导致的车速变化以及司机驾驶行为的变化方面还考虑不够。此外,由于缺乏50年一遇、100年一遇的交通影响数据,本文仅针对10年一遇的暴雨进行了车流量验证,对50年一遇和100年一遇的高强度暴雨内涝对交通的影响未进行验证,后续应进一步加强验证。

## 参考文献(References)

- 陈小鸿. 2004. 上海城市道路分级体系研究[J]. 城市交通, (1): 39-45. [Chen X H. 2004. Research on classification system of urban roads in Shanghai[J]. Urban Transport of China, (1): 39-45.]
- 董军刚. 2014. 城市暴雨内涝灾害风险评估工具集开发与应用研究: 以上海市为例[D]. 上海: 华东师范大学. [Dong J G. 2014. Research on development and application of urban rainstorm waterlogging disaster risk assessment toolset: A case study of Shanghai[D]. Shanghai, China: East China Normal University.]
- 费茉莉, 刘苇航, 王席, 等. 2017. 城市暴雨内涝模拟模型优化与精度验证[J]. 地球信息科学学报, 19(7): 895-900. [Fei M L, Liu W H, Wang X, et al. 2017. Optimization and verification of a novel hydrodynamic model for urban flood simulation[J]. Journal of Geo-information Science, 19(7): 895-900.]
- 郭泽斌, 李振龙. 2013. 城市道路拥堵程度评判方法研究[J]. 交通标准化, (11): 62-65. [Guo Z B, Li Z L. 2013. Evaluation method of city road congestion degree[J]. Transportation Standardization, (11): 62-65.]
- 黄清雨. 2017. 暴雨内涝影响下城市交通动态模拟工具的开发与应用: 以上海市黄浦区为例[D]. 上海: 华东师范大学. [Huang Q Y. 2017. Development of a toolset for modeling the urban traffic flow with influence of pluvial flooding: A case study for Huangpu District in Shanghai[D]. Shanghai, China: East China Normal University.]
- 黄清雨, 董军刚, 李梦雅, 等. 2016. 暴雨内涝危险性情景模拟方法研究: 以上海中心城区为例[J]. 地球信息科学学报, 18(4): 506-513. [Huang Q Y, Dong J G, Li M Y, et al. 2016. Research on the scenario simulation method of rainstorm waterlogging hazard: A case study in the central urban area of Shanghai[J]. Journal of Geo-information Science, 18(4): 506-513.]
- 刘家宏, 陈根发, 王海潮, 等. 2015. 暴雨径流管理模型理论及其应用: 以SWMM为例[M]. 北京: 科学出版社. [Liu J H, Chen G F, Wang H C, et al. 2015. Baoyu jingliu guanli moxing lilun jiqi yingyong: Yi SWMM wei li[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 陆锋. 2001. 最短路径算法: 分类体系与研究进展[J]. 测绘学报, 30(3): 269-275. [Lu F. 2001. Shortest path algorithms:

- Taxonomy and advance in research[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 30(3): 269-275.]
- 沈颖, 朱翀, 徐英俊. 2007. 道路饱和度计算方法研究[J]. *交通标准化*, (1): 125-129. [Shen Y, Zhu C, Xu Y J. 2007. Research on calculation method for road saturation[J]. *Communications Standardization*, (1): 125-129.]
- 王笑. 2015. 暴雨天气下城市快速路交通流特性研究[D]. 北京: 北京交通大学. [Wang X. 2015. Research on the impact of torrential rain on traffic flow characteristics of expressways[D]. Beijing, China: Beijing Jiaotong University.]
- 张波良, 张瑞昌, 关佶红. 2014. 道路网上最短路径算法综述[J]. *计算机应用与软件*, 31(10): 1-9. [Zhang B L, Zhang R C, Guan J H. 2014. A survey on shortest path algorithms in road networks[J]. *Computer Applications and Software*, 31(10): 1-9.]
- 张林. 2008. 动态车辆导航系统车道级路径引导方法研究[D]. 长春: 吉林大学. [Zhang L. 2008. Research on lane level route guidance methods for dynamic vehicle navigation system[D]. Changchun, China: Jilin University.]
- Hassan Y A, Barker D J. 1999. The impact of unseasonable or extreme weather on traffic activity within Lothian region, Scotland[J]. *Journal of Transport Geography*, 7(3): 209-213.
- Hu Y J, Wang F H. 2015. Decomposing excess commuting: A Monte Carlo simulation approach[J]. *Journal of Transport Geography*, 44: 43-52.
- Huang Q Y, Wang J, Li M Y, et al. 2017. Modeling the influence of urbanization on urban pluvial flooding: A scenario-based case study in Shanghai, China[J]. *Natural Hazards*, 87(2): 1035-1055.
- Mitsakis E, Stamos I, Diakakis M, et al. 2014. Impacts of high-intensity storms on urban transportation: Applying traffic flow control methodologies for quantifying the effects[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(8): 2145-2154.
- Su B N, Huang H, Li Y T. 2016. Integrated simulation method for waterlogging and traffic congestion under urban rainstorms[J]. *Natural Hazards*, 81(1): 23-40.
- Tsapakis I, Cheng T, Bolbol A. 2013. Impact of weather conditions on macroscopic urban travel times[J]. *Journal of Transport Geography*, 28: 204-211.
- Yin J, Yu D, Lin N, et al. 2017. Evaluating the cascading impacts of sea level rise and coastal flooding on emergency response spatial accessibility in Lower Manhattan, New York City[J]. *Journal of Hydrology*, 555.

## Urban traffic congestion caused by rainstorms and inundation

HU Wenyan<sup>1,2</sup>, LI Mengya<sup>1,2</sup>, WANG Jun<sup>1,2\*</sup>, HUANG Qingyu<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Geographic Information Science (Ministry of Education), East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

**Abstract:** In recent years, pluvial flash floods (PFF) have caused serious traffic congestion and disruption in many big cities. This study investigated the traffic congestion pattern due to PFFs in an intra-urban area through a macro traffic simulation method. A macro traffic flow model was built based on trip distribution and the characteristics of roads and routing. We incorporated rainfall data and simulated the hourly traffic volume on each road segment under two PFF scenarios of 50-year and 100-year return periods by the macro traffic flow model. Next, the variation of volume/capacity (V/C) on each road was calculated to derive the spatial pattern of traffic condition under different PFF scenarios. The results were contrasted to demonstrate the change of congestion pattern on the main roads and entrances/exits of the expressways in the city center of Shanghai to analyze the influence of different PFF scenarios on traffic congestion. The results indicate that ①PFFs of 50-year return period may have a marginal effect on the traffic system, but PFFs of 100-year return period can pose great threat to the traffic system in the central urban area of Shanghai. Seven exits and entrances of the expressways are closed due to serious inundation and a large portion of the road network becomes more congested; ②the effect of PFFs on V/C also exhibits spatial disparity over the entire network. Overall, 13.35% of the roads become more congested under 100-year return period. Additionally, the most obvious change of congestion pattern is found on the first-class highways (23.31%), such as Dalian Road, Wuning Road, Zhoujiazui Road, and Changshou Road.

**Key words:** macro traffic simulation; pluvial flash flood; road network; volume/capacity; Shanghai