

# 天气因素对城市地铁客流时空分布的影响 ——基于智能交通卡数据的实证研究

许熲灵,付 晓\*,汤君友,刘志远

(东南大学交通学院,南京 211189)

**摘要:**城市地理空间、气候环境及交通系统间存在复杂的相互联系、相互制约的关系,交通及地理时空数据为理解三者间关系带来了新的机遇。城市轨道交通是居民绿色出行、缓解中国大城市交通拥堵的重要交通方式。深入研究影响城市地铁客流时间和空间分布变化的因素,有利于制定合理的土地利用及交通需求管理政策,也可为实时响应特定天气条件下旅客出行需求的变化和优化公交服务运营提供理论依据。论文使用智能交通卡数据,以南京市为例,通过建立一种季节性差分自回归移动平均(seasonal autoregressive integrated moving average with explanatory variables, SARIMAX)模型,解释不同类型的天气因素(如降雨、气温、相对湿度、风速等)对地铁客流量时空分布的影响程度。研究发现:降雨类因素在高峰和周末时段对地铁客流量的影响较大;各天气因素对各地铁站点客流量的影响大致呈现出从城市中心区域向外围区域逐渐变小的渐变式规律,且地铁无规律出行者比有规律出行者更易受恶劣天气因素的影响。

**关键词:**城市轨道交通;智能交通卡数据;客流时空分布;天气因素;南京市

研究人类的时空行为,可为理解人类活动和城市环境之间的复杂关系提供有利依据和明确方向,也可在某种程度上改善城市居民的生活质量。公共交通为城市居民提供了一种大规模和可持续的流动选择,在城市地理和经济活动中起着至关重要的作用。

城市公共交通系统需要满足人们从日常通勤出行到无规律、灵活多变的出行需求,基于智能交通卡数据,研究者们从城市空间、公交服务等方面发掘了城市居民的出行特征<sup>[1]</sup>。从交通系统层面,黄洁等<sup>[2]</sup>通过智能交通卡数据计算出行时间和OD矩阵,研究客流的时空分布特征;Huang等<sup>[3]</sup>评估了各个车站的就业岗位数与就业人数之比;Zhou等<sup>[4]</sup>

利用北京市智能交通卡和家庭出行调查数据研究了小汽车和公共汽车用户的通勤率和通勤范围。从用户层面,Huang等<sup>[5]</sup>通过北京市智能交通卡数据,研究了城市居民可忍受的最大通勤时间。

然而,影响公共交通出行量的关键因素,不仅有城市空间、公共交通服务水平、通勤需求等,外界环境条件如天气的变化也会对公交客流产生显著影响<sup>[6-9]</sup>。陶遂<sup>[10]</sup>利用一种地理可视化方法,揭示了城市尺度下基于公交出行的时空分布特征,以及在不同因素(包括快速公交道、乘客族群和天气)作用下的变化规律。为探究天气因素对城市公共交通出行产生的影响,研究者们针对不同天气因素(如降雨、湿度、气温等)建立模型阐明相互作用关系以

收稿日期:2019-02-11;修订日期:2019-07-09。

基金项目:国家自然科学基金项目(71601045);江苏省社会科学基金项目(16GLC008);中央高校基本科研业务费项目(2242019K40203)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 71601045; Social Science Foundation of Jiangsu Province, No. 16GLC008; Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 2242019K40203.]

第一作者简介:许熲灵(1994—),女,湖北宜昌人,硕士生,主要从事交通地理信息系统、交通大数据研究。

E-mail: 522282287@qq.com

\*通信作者简介:付晓(1988—),女,安徽蚌埠人,博士,副教授,主要从事活动与出行行为建模、多模式交通网络均衡问题研究。E-mail: fuxiao@seu.edu.cn

引用格式:许熲灵,付晓,汤君友,等.天气因素对城市地铁客流时空分布的影响:基于智能交通卡数据的实证研究[J].地理科学进展,2020,39(1):45-55.[Xu Manling, Fu Xiao, Tang Junyou, et al. Effects of weather factors on the spatial and temporal distributions of metro passenger flows: An empirical study based on smart card data. Progress in Geography, 2020, 39(1): 45-55.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.01.005

及进行客流预测<sup>[11-13]</sup>。Trepantier等<sup>[14]</sup>利用智能交通卡数据,对公交出行量作出统计分析,并按每时段出行量的不同将人群分类,建立多元线性回归模型,判断天气对出行影响的程度。Tao等<sup>[15]</sup>利用智能交通卡数据及天气数据,建立了3个不同空间尺度的模型。考虑到不同时段天气对客流的影响程度不同,Singhal等<sup>[16]</sup>通过更加详细的每小时客流数据,建立了最小二乘法回归模型研究客流受天气的影响。考虑到不同种类人群有不同的出行特征,Arana等<sup>[17]</sup>建立了周末客流量与天气因素之间关系的多元回归模型,获得了有规律出行者与无规律出行者的不同出行特征。由于一年内四季的天气情况相差较大,Stover等<sup>[18]</sup>考虑风速、气温、降雨和降雪4个天气因素对公交客流的影响,针对不同季节分别建立了多元回归模型,并用最小二乘法评估模型参数。

近年来,恶劣天气(如雾霾、暴雨等)频繁发生,突发天气状况对城市公共交通和城市居民出行的影响十分显著<sup>[19-20]</sup>,如何模拟天气因素对城市公共交通客流时空分布的影响是城市地理学及交通规划中亟待研究的关键问题之一<sup>[21-23]</sup>。一天中每小时客流量模式通常与前一天每小时客流量相关,时间自相关可能使天气对公交乘客的影响产生偏差估计。根据一天中的不同时间(如高峰时段和非高峰时段),公交客流通常呈现出具有周期性的时间序列。因此,为有效反映天气变化对公共交通出行的影响,应尽量减少时间序列的自相关性来建立模型。为满足上述要求,本文采用时间序列模型,如季节性差分自回归移动平均(seasonal autoregressive integrated moving average with explanatory variables, SARIMAX)模型,以模拟天气因素对公交客流的影响。时间序列法是在分析时间序列之间相关性的基础上,通过估计相关参数,采用历史数据预测未来发展趋势的方法。相比于常规的时间序列方法,SARIMAX模型在考虑内生关系的基础上,分析了外界变量对拟合内容的冲击作用,大幅度提高了外界条件变化的拟合精度。

城市轨道交通是承载大运量客流的主要交通方式,在中国大部分大中型城市的居民通勤和日常活动中,扮演着重要角色。智能交通卡记录的轨道交通出行信息能够有效体现城市地铁客流分布受天气影响的程度,然而,在现有的诸多相关研究成果中缺乏从特定起讫点对间客流和不同人群地铁出行的角度探讨其受天气因素的影响。为填补天

气因素对城市地铁客流时空分布影响研究的空缺,本文分别从时间维度和空间维度进行相关研究。以南京地铁为例,利用大量智能交通卡数据和天气记录数据,建立 SARIMAX 模型研究天气因素对地铁客流量产生的影响。在时间维度上,分别分析在工作日高峰时期、周六及周日,特定起讫点对间每小时客流量与各天气因素(如降雨、气温等)之间的关系;从空间维度上,分别分析地铁有规律出行者与无规律出行者于市内各个地铁站点的每小时客流量与天气因素之间的关系。研究结果既可为不同天气状况下的线路行车组织方案制定、车站客流组织、客流预警、紧急客流预案制定等提供数据支持,也可为城市交通规划及土地利用规划提供理论依据。

## 1 研究区域与数据

### 1.1 研究区域

本文研究区域为南京市各主要行政区(包括玄武区、鼓楼区、秦淮区、雨花台区、建邺区、栖霞区、江宁区、浦口区 and 六合区),研究了南京市6条运营中地铁线路(1号线、2号线、3号线、10号线、S1号线和S8号线),共113个地铁站点。研究区域及涉及的地铁线路和站点分布如图1所示。

### 1.2 研究数据

本文需选用天气变量变化幅度较大且雨量适中的时间段,2016年全年不同时段的天天气情况对比情况如表1所示。从表1中可以看出,6个时段中1—2月、3—4月比较符合上述要求,但2月份含有春节长假,返乡潮会极大地影响城市居民地铁出行的一般性规律。由于收集到的地铁刷卡数据中3月1—8日的的数据不全,因此最终选取2016年3月9日至2016年4月30日这一时段讨论天气对地铁客流量的影响。该研究时段的各天气变量变化幅度较大,且降雨天数占比适中。

本文数据来源为南京地铁刷卡数据以及研究时段内每日每时的天气记录数据。其中,地铁刷卡数据由每位乘客使用智能交通卡出入地铁站闸机获得,具体形式如表2;天气数据由相关天气信息网获得,具体形式如表3,表中包含的5项天气因素(气温、相对湿度、气压、风速和降雨)为本文研究的天气变量。上述5项天气因素的每日变化情况如图2所示。从图2中可知:在研究时段内,有降雨出现的

天数适中,气温大约在4~22℃之间浮动,相对湿度在40%~93%之间浮动,风速在5~20 km/h之间浮动。

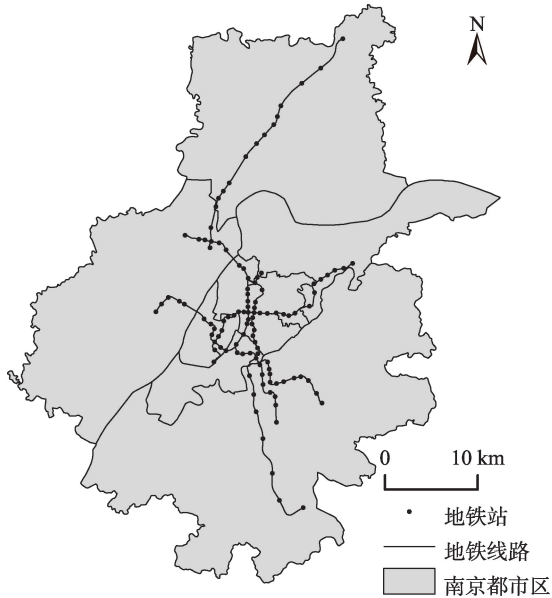


图1 研究区域与南京市地铁线路和站点分布

Fig.1 The study area and the metro network of Nanjing City

## 2 研究方法

本文采用季节性差分自回归移动平均模型(SARIMAX模型)来拟合地铁客流量与天气因素之间的相互作用关系。

### 2.1 SARIMAX 模型原理

SARIMAX模型起源于自回归积分滑动平均(autoregressive integrated moving average, ARIMA)模型,ARIMA模型的一般形式为:

$$(1 - \phi_1 B^1 - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p)(1 - B)^d Y_t = (1 - \theta_1 B^1 - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q) u_t \quad (1)$$

式中:  $Y_t$  是  $t$  时刻值的拟合值;  $\phi$  是自回归参数(如  $\phi_1 Y_{t-1}$ );  $\theta$  是移动平均参数(如  $\theta_1 Y_{t-1}$ );  $B$  是后移算子,定义  $B^i(Y_t) = Y_{t-i}$ ;  $p$  为自回归项数,  $q$  为滑动平均项数;  $d$  是差分项(如  $d_1$  表示  $Y_t - Y_{t-1}$ );  $u_t$  是误差项。

当一个时间序列显示出季节性重复模式时,ARIMA模型可以扩展成为季节性ARIMA模型,即SARIMA模型。具体形式如下:

表1 各时段天气情况对比

Tab.1 Comparison of weather conditions in different time periods

时间	气温差/℃	相对湿度差/%	气压差/hPa	风速差/(km/h)	降雨天数占比/%
1—2月	10.00	<b>53.0</b>	<b>32.51</b>	13	33.3
3—4月	<b>18.34</b>	50.0	27.77	<b>25</b>	29.5
5—6月	14.44	44.0	19.64	18	47.5
7—8月	11.11	44.5	12.19	11	27.4
9—10月	17.77	41.0	30.82	24	42.6
11—12月	16.67	35.5	22.01	21	36.1
研究时段(3月9日—4月30日)	18.34	50.0	27.77	25	28.3

注:加粗数值所在时段为对应该天气变量下的最佳研究时段。

表2 智能交通卡数据记录

Tab.2 Smart card data of the metro system

日期	卡号	卡种	设备编号	进站时间	进站站点编号	出站时间	出站站点编号
2016-03-09	990772894357	102	22079702	15:58:08	98	16:07:42	97
2016-03-09	990772838262	101	22022805	15:23:43	25	15:38:29	28
2016-03-09	993172771712	3	22046202	13:09:36	2	13:38:18	62

表3 天气数据记录

Tab.3 Weather data

日期	时间	气温/℃	相对湿度/%	气压/hPa	风向	风速/(km/h)	天气状况
2016-03-09	5:00	3	75	1027	东北偏北	10.8	晴间多云
2016-03-09	6:00	3	70	1027	东北	14.4	晴间多云
2016-03-09	8:00	3	70	1029	东北	21.6	晴

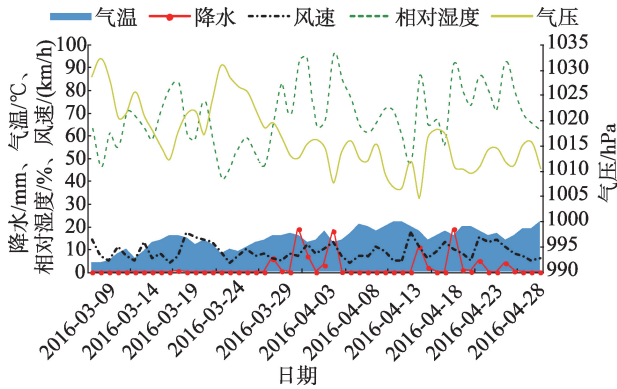


图2 研究时间段内每日各天气因素变化情况

Fig.2 Daily changes of different weather parameters during the study period

$$Y_t = (1 - \theta_1 B^1 - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q)(1 - \Theta_1 B^{1s} - \Theta_2 B^{2s} - \dots - \Theta_\sigma B^{\sigma s}) / (1 - \phi_1 B^1 - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p) \quad (2)$$

$$(1 - \Phi_1 B^{1s} - \Phi_2 B^{2s} - \dots - \Phi_p B^{ps})(1 - B)^d (1 - B^s)^D / u_t$$

式中： $D$ 是季节性差分项； $\Phi$ 是季节性自回归参数； $\Theta$ 是季节性移动平均参数； $s$ 表示该模型的季节长度。

ARIMA和SARIMA模型仅适用于预测单变量的时间序列，而ARIMAX和SARIMAX模型可将若干外界变量作用于时间序列，其具体形式为把ARIMA(或SARIMA)过程加入多元回归模型：

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 X_{1,t} + \beta_2 X_{2,t} + \dots + \beta_k X_{k,t} + N_t \quad (3)$$

式中： $Y_t$ 是时间序列因变量； $X_{1,t} \sim X_{k,t}$ 是外界变量； $\beta_0 \sim \beta_k$ 是相关回归系数； $N_t$ 是误差项，可扩展为以下形式：

$$N_t = (1 - \theta_1 B^1 - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q)(1 - \Theta_1 B^{1s} - \Theta_2 B^{2s} - \dots - \Theta_\sigma B^{\sigma s}) / (1 - \phi_1 B^1 - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p) \quad (4)$$

$$(1 - \Phi_1 B^{1s} - \Phi_2 B^{2s} - \dots - \Phi_p B^{ps})(1 - B)^d (1 - B^s)^D / \varepsilon_t$$

式中： $\varepsilon$ 是白噪声误差。

将式(4)中的 $N_t$ 代入式(3)即可得到SARIMAX模型<sup>[15,24]</sup>。

## 2.2 数据选择

本文关注的天气因素包括气温、相对湿度、气压、风速和降雨，并分别从时间维度(工作日早、晚高峰以及周六、周日)和空间维度2个方面对比研究不同天气因素对地铁客流量的影响程度。其中，工作日早、晚高峰客流量是选取研究时段中每个工作日早、晚各2h(早高峰7:00~9:00，晚高峰17:00~19:00)客流的季节性时间序列，周六及周日客流量是选取研究时段中每个周六(或周日)地铁运营时段

内(5:00~23:00)客流的季节性时间序列。因此，上述情况下的客流时空分布分析由以下2个步骤实施：①统计小时客流量以实现单变量的SARIMA模型；②加入天气变量作为外界变量调整SARIMA模型以实现天气因素对地铁小时客流量影响的研究。

在通勤者和职住地识别等方面，学者们按照不同的研究背景进行不同的识别过程。如Zhou等<sup>[4]</sup>通过在上班和下班到达地点、停留时长、是否为一天中首地点以及频次等方面识别通勤者的职住地情况；Arana等<sup>[17]</sup>认为由于使用智能交通卡乘坐地铁比使用现金更加划算，故将使用智能交通卡乘坐地铁的乘客视为经常乘坐者、使用现金乘坐地铁的乘客视为偶尔乘坐者。由于本文数据基础为智能交通卡数据，因此本文按照持卡者使用地铁出行的频率高低判别地铁有规律出行者和无规律出行者，将在工作日早、晚高峰时期内使用地铁完成通勤行为的人群识别为地铁有规律出行者，其他视为无规律出行者。不考虑通勤者的职住地识别，只将通勤行为作为筛选依据，划分过程如下：从数据库中提取出一周内共1848154位持卡者的地铁出行记录，筛选出在该周内5个工作日的7:00~9:00和17:00~19:00两个时间段(早、晚高峰)内皆有刷卡记录的27947位持卡者视为地铁有规律出行者，剩下的1820207位持卡者视为地铁无规律出行者。

## 3 结果与分析

本文分别从时间维度和空间维度对地铁客流量与天气因素建立模型进行对比分析，研究结果分析如下。

### 3.1 时间维度对比分析

将客流时间序列与天气变量(气温、相对湿度、气压、风速和降雨变量)建立SARIMAX模型，结果如表4和表5所示。在分析的这5项天气变量中，与降雨变量相关的天气状况分晴天、小雨、中到大雨和雷阵雨4类，需引用3个虚拟变量表示降雨情况(晴天情况作为模型标准)<sup>[15,25]</sup>；其余4项变量的系数值规定为某1个变量变化1个单位，即气温变化1℃、相对湿度变化1%、气压变化1hPa、风速变化1km/h，而导致客流量的变化。在周六及周日统计时段内的降雨中出现了不同的降雨量，故表5中将降雨变量细分为降雨(小雨)、降雨(中到大雨)和降

雨(雷阵雨)3种变量。两表中P值可衡量各变量的显著性,AIC衡量该统计模型拟合的优良性,MAPE为模型的平均绝对百分比误差。其中,表4和表5中各个变量在模型中体现出的显著性(P值),符合Tao等<sup>[15]</sup>对公共汽车客流受天气因素的影响研究模型中各变量的显著性结果,由表4、表5中AIC和MAPE可知该模型对此类分析的适用性较好。

对比表4、表5结果,可得到各个天气变量在不同时段对地铁客流量的影响程度。降雨类变量对人们的地铁出行有较强负影响,且在工作日早高峰和周日表现出显著性,降雨会导致周末地铁出行量的下降。然而,降雨导致晚高峰地铁客流量减少比早高峰客流量多,这是由于在早高峰时段人们需准时到达工作岗位的强约束性。而从周六地铁总客流量大于周日且降雨类变量对周六客流量的负影响程度弱于周日,可以推出在周六人们的购物休闲出行的欲望强于周日。在所有天气变量中,影响最弱的变量为相对湿度,其系数绝对值在同时段所有变量中最小。

为探讨起讫点对间地铁客流与天气因素之间

关系,本文在研究区域内选择具有代表性的5个出发地铁站点(O点,皆为居住区)和5个到达地铁站点(D点,皆为商住混合区)分析,详细信息如表6所示,其中,D1(新街口)为中央商务区(CBD)。

图3至图6分别展示了5个主要天气因素分别在工作日早、晚高峰及周六、周日对各OD点对间地铁客流的影响。在所有时间段内对各个OD点对客流量影响最大的天气变量皆为降雨类变量,其次为气温变量,说明降雨、气温变化等最直接的天气变化最容易促使人们出行方式的改变;而其他变量在工作日早高峰对所有OD点对客流量的影响系数几乎在零值上下浮动,在工作日晚高峰相对来说浮动较为剧烈,而在周六和周日几乎都表现为固定值,说明工作日早高峰客流几乎不受这些变量的影响,而工作日晚高峰客流受影响程度较大,周末客流受影响程度未发生改变。降雨类变量对工作日早高峰及周六各个站点的客流量变化偏向于正影响,对周日则偏向于负影响,表明在这4个时间段内,周日出行的非必要性最高。总体看来,CBD地区受到所有天气因素的影响较强,这是由于

表4 天气因素对地铁客流影响模型结果(工作日早晚高峰)

Tab.4 Modeling results of the impact of weather factors on metro passenger flows (during peak hours on working days)

时段	变量	系数	P值	AIC	MAPE
早高峰	气温	-47	0.81	1236.27	1.68%
	相对湿度	-31	0.55		
	气压	-96	0.59		
	风速	190	0.01**		
	降雨	-2827	0.09*		
晚高峰	气温	315	0.59	1467.68	5.94%
	相对湿度	-77	0.60		
	气压	262	0.62		
	风速	-473	0.04**		
	降雨	-3533	0.57		

注:\*\*、\*分别表示P<0.05、P<0.1;MAPE为模型的平均绝对百分比误差。下同。

表5 天气因素对地铁客流影响模型结果(周六及周日)

Tab.5 Modeling results of the impact of weather factors on metro passenger flows (during Saturdays and Sundays)

时间	变量	系数	P值	AIC	MAPE
周六	气温	-57	0.31	2797.00	7.79%
	相对湿度	-2	0.88		
	气压	-51	0.30		
	风速	-31	0.34		
	降雨(小雨)	-469	0.78		
	降雨(中雨到大雨)	-672	0.46		
	降雨(雷阵雨)	-1329	0.24		
周日	气温	98	0.40	2399.27	8.67%
	相对湿度	12	0.52		
	气压	65	0.28		
	风速	-8	0.79		
	降雨(小雨)	-1429	0.04**		
	降雨(中到大雨)	-3968	0.02**		

表6 O、D点详细情况

Tab.6 Selected origin-destination (OD) pairs in Nanjing City

代表点	O1	O2	O3	O4	O5	D1	D2	D3	D4	D5
实际地铁站点	柳洲东路	油坊桥	双龙大道	马群	迈皋桥	新街口	集庆门大街	元通	仙林中心	百家湖
站点性质	西北向 居住区	西向 居住区	南向 居住区	东北向 居住区	北向 居住区	CBD	西向商住 混合区	西南向商住 混合区	东北向商住 混合区	南向商住 混合区

注:此表为工作日早高峰的O、D点选取,工作日晚高峰的O、D点选取与早高峰相反,周末的O、D点选取与早高峰情况相同。

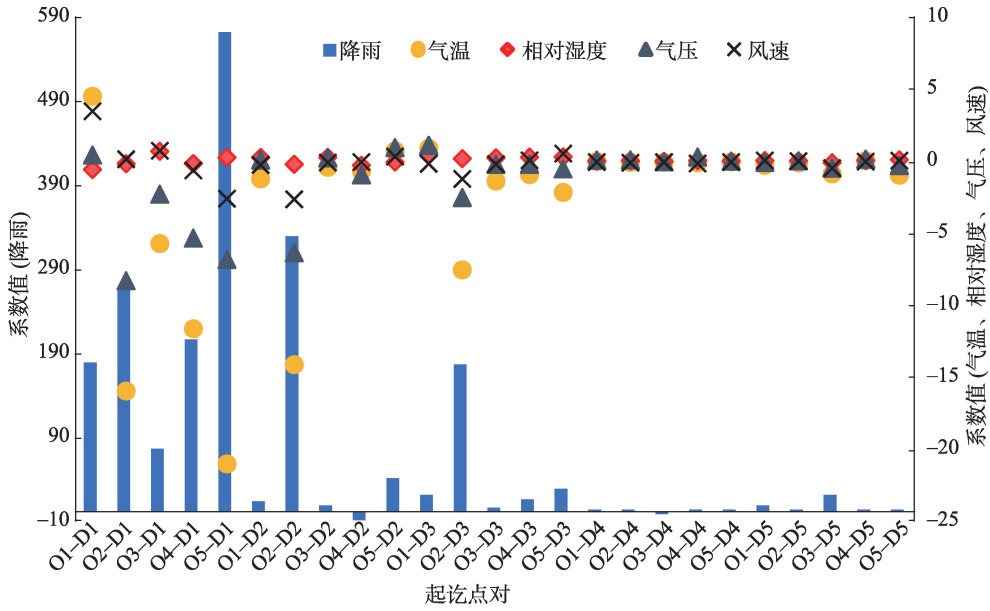


图3 不同天气因素对各OD点对间客流的影响系数值(工作日早高峰)

Fig.3 Effects of different weather factors on passenger flows between selected origin-destination (OD) pairs (during morning peaks on working days)

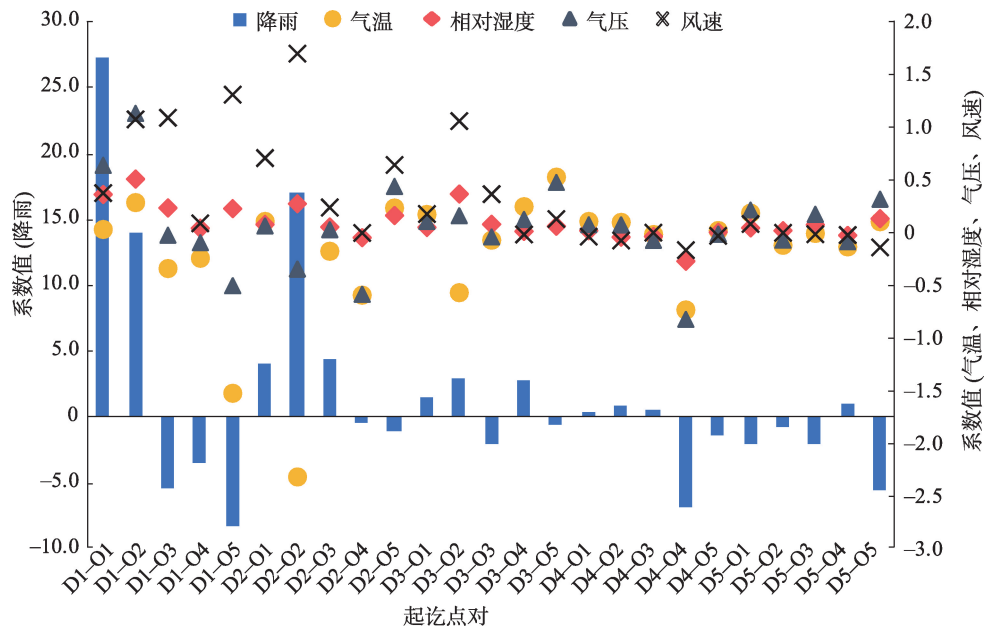


图4 不同天气因素对各OD点对间客流的影响系数值(工作日晚高峰)

Fig.4 Effects of different weather factors on passenger flows between selected origin-destination (OD) pairs (during evening peaks on working days)

CBD地区的交通情况较为复杂,可选择的交通方式较多。在工作日早高峰以及周六、周日时段内,降雨类变量对从CBD去往西北向居住区客流量的负影响最为突出(图3、图5、图6的O5-D1),该居住区位于与中心城区有着一江之隔的浦口区,较长的行程距离和行程时间以及恶劣天气下的交通不便

可能是导致客流下降的主要原因。

### 3.2 空间维度对比分析

利用上文中数据筛选得到的地铁有规律出行者和无规律出行者2类人群,建立基于各地铁站点的地铁有规律出行者与无规律出行者客流量受天气因素影响的SARIMAX模型,可以从空间维度对

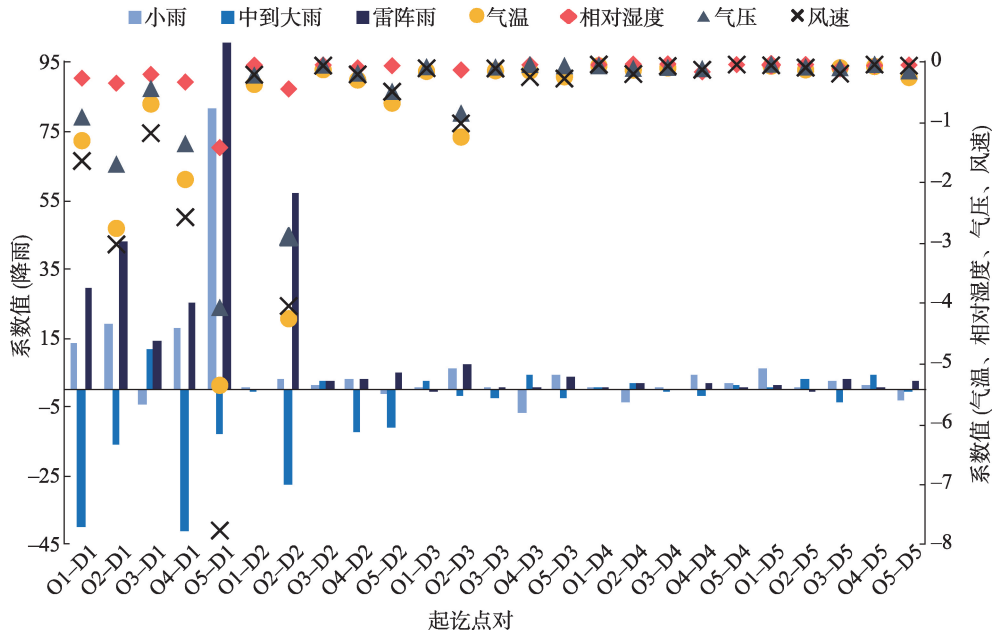


图5 不同天气因素对各OD点对间客流的影响系数值(周六)

Fig.5 Effects of different weather factors on passenger flows between selected origin-destination (OD) pairs (on Saturdays)

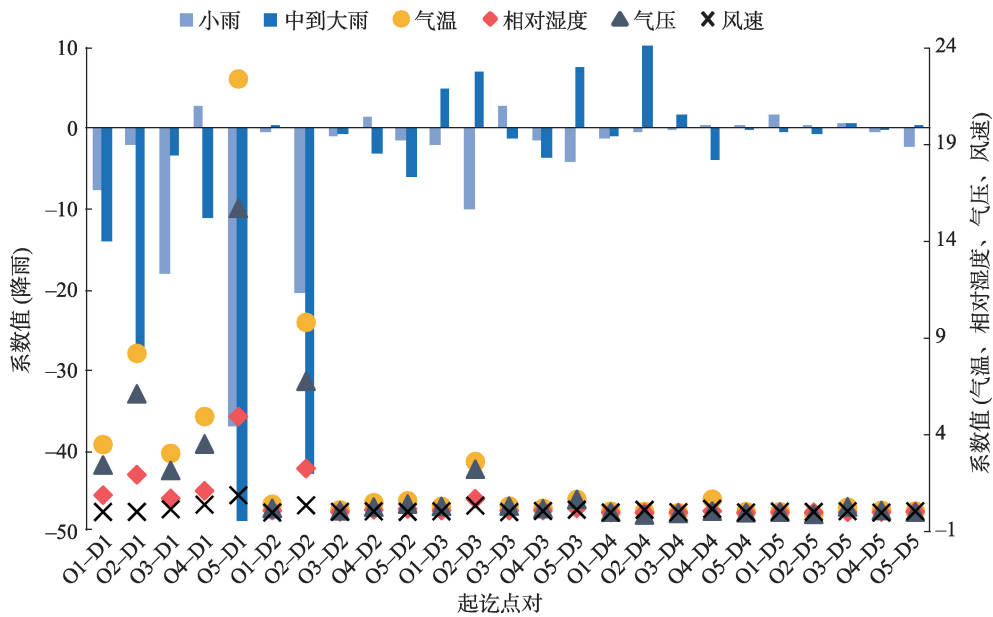


图6 不同天气因素对各OD点对间客流的影响系数值(周日)

Fig.6 Effects of different weather factors on passenger flows between selected origin-destination (OD) pairs (on Sundays)

比分析各项天气因素的作用程度。

以气温、降雨(小雨)、降雨(中到大雨)3个变量为例,图7展示了2类人群(地铁有规律出行者及无规律出行者)于各地铁站点受上述3个变量影响的系数值。从站点空间分布情况来看,容易受天气影响的站点一般位于城市中心,且地铁无规律出行者更易受天气的影响。对于气温变量(图7a),地铁有

规律出行者在全城范围内几乎不受该因素的影响,但气温的变化导致无规律出行者在大部分站点受其负影响较为明显,且该变量的影响规律大致呈现出从中心区域向外围区域由较大影响转化为几乎无影响的渐变式规律。由图7b可见:除一些特殊站点(大型居住区和大型交通枢纽)外,降雨(小雨)在绝大部分站点对所有出行者皆产生正影响,表现为

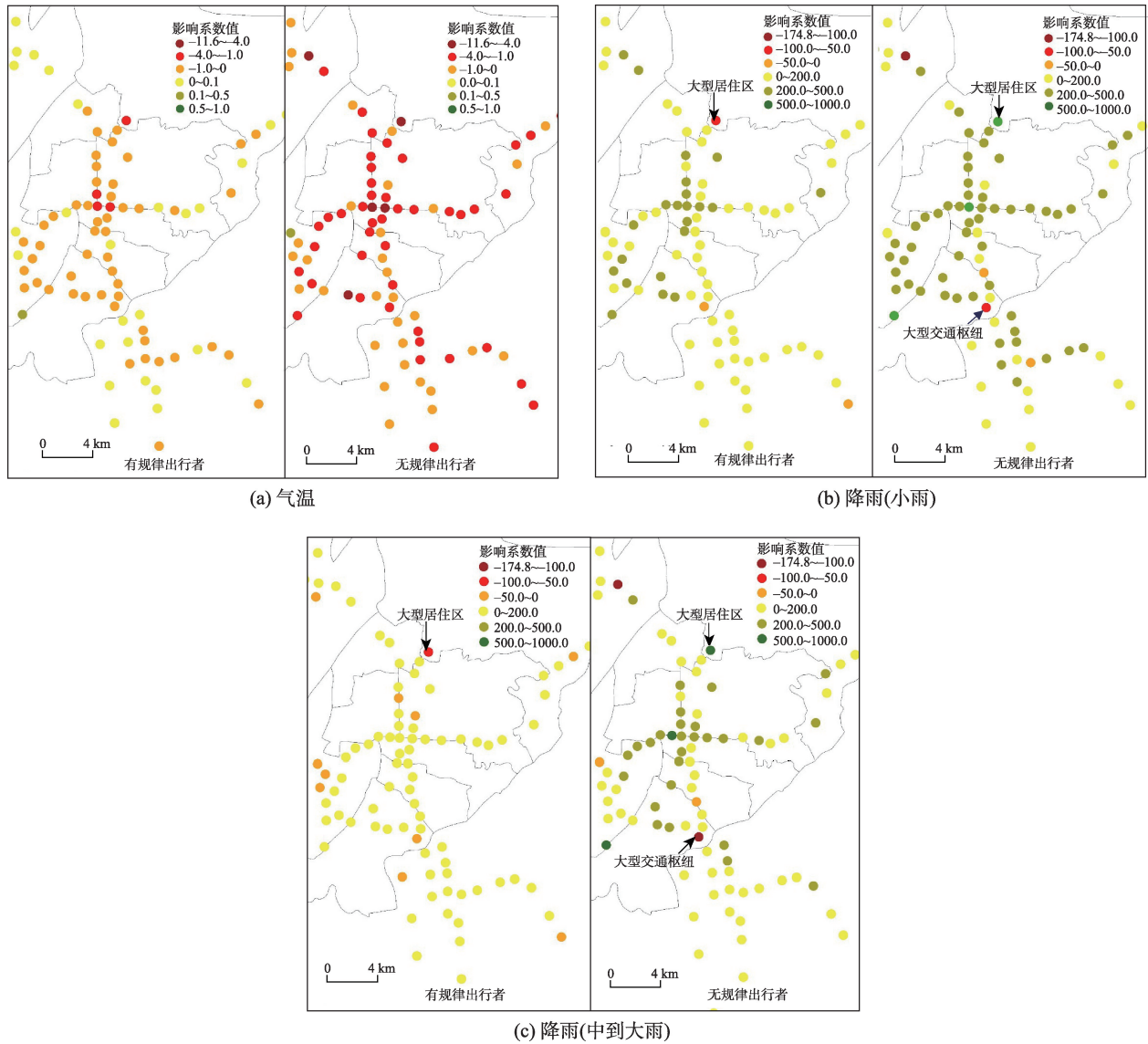


图7 不同天气变量对各地地铁站有规律出行者和无规律出行者的影响系数值

Fig.7 Effects of different weather factors on two groups of passengers at different metro stations

出行者在出现降雨(小雨)情况下会更多地选择地铁。相对于有规律出行者,地铁无规律出行者受降雨(小雨)的影响更大,该变量的影响规律大致具有从中心区域向外围区域由较大正影响转化为较小正影响的渐变式规律。随着降雨量的增大,所有出行者受降雨的影响十分显著(图7c),且除一些特殊站点(大型居住区和大型交通枢纽)外,大致逐渐从中心区域向外围区域由较大正影响转变为较小正影响,在城市中心区域,地铁无规律出行者比有规律出行者受降雨(中到大雨)的正影响更大。综合图7b和7c可以发现,地铁无规律出行者在大部分站点表现出受到降雨的正影响,其原因是降雨导致的路面交通不畅会吸引该类人群改用地铁出行,而有

规律出行者则较少因为是否降雨而改变其对地铁的使用。

## 4 结论与讨论

本文基于南京市智能交通卡数据,运用一种时间序列模型——季节性差分自回归移动平均(SARIMAX)模型研究地铁小时客流量随各天气因素(包括气温、相对湿度、气压、风速和降雨)变化的关系,从时间维度和空间维度作了比较分析与深入探讨。研究表明:

(1) 从时间维度来看,在工作日早、晚高峰及周六、周日,降雨对地铁客流量变化有较强负影响,且



在工作日早高峰和周日表现出显著性;同时,降雨也是影响OD点对间客流量的最大影响因素;以CBD为O/D点的客流受天气影响最大。

(2)从空间维度来看,除一些特殊站点(大型居住区和大型交通枢纽)外,各天气因素对各地铁站点客流量的影响大致呈现出从城市中心区域向外围区域逐渐变小的渐变式规律;对比地铁有规律及无规律出行者2类人群,发现无规律出行者比有规律出行者更易受到天气的影响,例如,当降雨量较大时,更多的无规律出行者会选择地铁出行。

针对近年来恶劣天气频繁发生的现象,可结合实际天气变量将本文关注的关系模型运用于交通及城市管理之中。一方面,能有效预测地铁站点及线路中因天气而产生的突发客流变化;另一方面,也可根据城市居民地铁出行偏好及时空差异性制定合理的客流组织方案。本文的研究充分体现出智能交通卡数据所具有的大样本、准确性、个体维度的优势。掌握不同天气因素对轨道交通客流出行时空特征,可以更加深入地理解城市居民的通勤出行与其他出行受不同天气因素的影响程度。研究结果既可为提升公共交通服务效率和品质提供参考和依据,提高地铁客流预测的准确性,完善既有的轨道交通客流预测理论体系,也是智慧城市规划和精细化城市管理中的重要组成部分。这将有助于深入理解城市复杂交通地理环境及居民日常出行的相互关系,也可为城市公共交通和用地系统的规划管理及政策制定提供更具体的依据。

但本文在数据和方法上仍存在一定的局限性,例如,仅结合智能交通卡记录的地铁出行数据探讨了客流量与天气因素之间的相互作用关系,未来可结合其他多种交通方式(如出租车、常规公交等)的出行数据,利用多种分析方法进行深入探讨。

## 参考文献(References)

[1] 关雪峰,曾宇媚. 时空大数据背景下并行数据处理分析挖掘的进展及趋势[J]. 地理科学进展, 2018, 37(10): 1314-1327. [Guan Xuefeng, Zeng Yumei. Research progress and trends of parallel processing, analysis, and mining of big spatiotemporal data. *Progress in Geography*, 2018, 37(10): 1314-1327.]

[2] 黄洁,王姣娥,靳海涛,等. 北京市地铁客流的时空分布格局及特征: 基于智能交通卡数据[J]. 地理科学进展, 2018, 37(3): 397-406. [Huang Jie, Wang Jiaoe, Jin Haitao, et al. Investigating spatiotemporal patterns of pas-

senger flows in the Beijing metro system from smart card data. *Progress in Geography*, 2018, 37(3): 397-406.]

[3] Huang J, Levinson D, Wang J, et al. Job-worker spatial dynamics in Beijing: Insights from smart card data [J]. *Cities*, 2019, 86: 83-93.

[4] Zhou J P, Murphy E, Long Y. Commuting efficiency in the Beijing metropolitan area: An exploration combining smartcard and travel survey data [J]. *Journal of Transport Geography*, 2014, 41: 175-183.

[5] Huang J, Levinson D, Wang J, et al. Tracking job and housing dynamics with smartcard data [J]. *PNAS*, 2018, 115(50): 12710-12715.

[6] Hofman M, O'mahony M. The impact of adverse weather conditions on urban bus performance measures: An analysis using ITS technology [C]// *Intelligent Transportation Systems*. 2005: 84-89. doi: 10.1109/ITSC.2005.1520087.

[7] Koetse M J, Rietveld P. The impact of climate change and weather on transport: An overview of empirical findings [J]. *Transportation Research Part D*, 2009, 14: 205-221.

[8] Teerayut H, Santi P, Tuck W L, et al. Weather effects on the patterns of people's everyday activities: A study using GPS traces of mobile phone users [J]. *PLoS One*, 2013, 8 (12): e81153. doi: 10.1371/journal.pone.0081153.

[9] 楚昌. 城市公共自行车出行特征及预测研究: 以纽约市为例[D]. 成都: 西南交通大学, 2016. [Chu Chang. Research on the public bicycle travel characteristics and prediction: A New York case study. Chengdu, China: Southwest Jiaotong University, 2016.]

[10] 陶遂. 基于智能公交卡数据的出行行为的时空分析及规划启示: 以布里斯班为例[J]. 上海城市规划, 2017 (5): 94-99. [Tao Sui. Spatial-temporal analysis of travel behavior using transit smart card data and its planning implications: A case study of Brisbane, Australia. *Shanghai Urban Planning Review*, 2017(5): 94-99.]

[11] 刘欣彤. 降雨天气条件下短时公交客流预测研究[D]. 深圳: 哈尔滨工业大学, 2016. [Liu Xintong. Research on short-term bus passenger demand forecasting under rainy weather conditions. Shenzhen, China: Harbin Institute of Technology, 2016.]

[12] 周顺. 基于IC卡刷卡数据的雨天轨道交通出行特征[C]// 中国城市规划学会城市交通规划学术委员会, 中国城市规划设计研究院. 交叉创新与转型重构: 2017年中国城市交通规划年会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017: 1-9. [Zhou Shun. Travel characteristics of rail transit in rainy days based on IC card data // *Urban Transportation Planning Academic Committee of China Urban Planning Society, China Academy Of Urban Plan-*

- ning & Design. Cross innovation and transformation reconstruction: Annual National Traffic Planning Conference 2017. Beijing, China: China Architecture & Building Press, 2017: 1-9. ]
- [13] 谢振东, 刘雪琴, 吴金成, 等. 公交IC卡数据客流预测模型研究 [J]. 广东工业大学学报, 2018, 35(1): 16-22. [Xie Zhendong, Liu Xueqin, Wu Jincheng, et al. Research on forecasting model of public passenger flow based on IC card data. Journal of Guangdong University of Technology, 2018, 35(1): 16-22. ]
- [14] Trepanier M, Agard B, Morency C. Using smart card data to assess the impact of weather on public transport user behavior [C]// Department of Transport Engineering and Logistics of the Pontificia Universidad Católica de Chile Conference on Advanced Systems for Public Transit. Santiago, Chile: The Ritz-Carlton, 2012: 1-15.
- [15] Tao S, Corcoran J, Rowe F. To travel or not to travel: 'Weather' is the question. Modelling the effect of local weather conditions on bus ridership [J]. Transportation Research Part C, 2018, 86: 147-167.
- [16] Singhal A, Kamga C, Yazici A. Impact of weather on urban transit ridership [J]. Transportation Research Part A, 2014: 379-391.
- [17] Arana P, Cabezudo S, Penalba M. Influence of weather conditions on transit ridership: A statistical study using data from smartcards [J]. Transportation Research Part A, 2014, 59: 1-12.
- [18] Stover V M, McCormack E D. The impact of weather on bus ridership in Pierce County, Washington [J]. Journal of Public Transportation, 2012, 15(1): 95-110.
- [19] Mesbah M, Luy M, Currie G. Investigating the lagged effect of weather parameters on travel time reliability [J]. WIT Transactions on Ecology and the Environment, 2014, 191: 795-801.
- [20] Kashfi S A, Bunker J M. Adverse weather effects on bus ridership [J]. Road & Transportation Research, 2015, 24 (1): 44-57.
- [21] Zhan G, Nigel H M W, Adam R. The impact of weather on transit ridership in Chicago [J]. Transportation Research Record, 2004, 2034: 3-10.
- [22] Lars B, Martin D, Jan P. Impact of everyday weather on individual daily travel behaviours in perspective: A literature review [J]. Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal, 2013, 33(1): 71-91.
- [23] Kashfi S A, Bunker J M B, Yigitcanlar T. Modelling and analysing effects of complex seasonality and weather on an area's daily transit ridership rate [J]. Journal of Transport Geography, 2016, 54: 310-324.
- [24] 王莹, 韩宝明, 张琦. 基于SARIMA模型的北京地铁站客流量预测 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15 (6): 205-211. [Wang Ying, Han Baoming, Zhang Qi. Forecasting of entering passenger flow volume in Beijing subway based on SARIMA model. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(6): 205-211. ]
- [25] 陶长琪. 计量经济学 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 2012. [Tao Changqi. Econometrics. Shanghai, China: Fudan University Press, 2012. ]

## Effects of weather factors on the spatial and temporal distributions of metro passenger flows: An empirical study based on smart card data

XU Manling, FU Xiao\*, TANG Junyou, LIU Zhiyuan  
(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China)

**Abstract:** Urban geographic space, climate, and transportation system are interrelated, and recently available traffic and spatial big data bring new opportunities for understanding the relationship among them. Urban rail transit is an important transport mode for residents to travel green and relieve traffic congestion in big cities in China. In-depth study of factors that affect the changes in the spatial and temporal distributions of metro passenger flows is conducive to the formulation of reasonable land use and traffic demand management policies, and can also provide a theoretical basis for real-time response to the changes in travel demand under specific weather conditions and optimization of transit service operation. To study the impact of weather conditions on metro usage in densely populated areas, in this research the influence of local weather factors (including temperature, humidity, rainfall and so on) on hourly metro passenger flows was investigated based on metro smart card data and weather data from Nanjing City, China. A time series model—seasonal autoregressive integrated moving average with explanatory variables (SARIMAX)—was developed to investigate the impact of weather conditions on metro passenger flows. It is found that some weather factors such as rainfall have significant influence on metro passenger flows. Except for some special sites (large residential areas and large transportation hubs), the influence of weather factors on metro passenger flows reduces gradually from the city center to suburban areas. The effects of weather conditions on regular metro passengers and irregular metro passengers were explicitly compared in this study. Irregular metro passengers are found more vulnerable to adverse weather conditions than regular metro passengers.

**Keywords:** urban metro system; smart card data; passenger flow distribution; weather factors; Nanjing City