

北京与伦敦地铁基于自动售检票数据的 客流出行规律对比分析*

王挺¹ 陈峰^{1,2} 王子甲^{1,2} 钟晨^{3,4} 黄建玲⁵

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院城市轨道交通研究中心, 100044, 北京;

2. 北京市轨道交通线路安全与防灾工程技术研究中心, 100044, 北京; 3. 伦敦国王学院地理系, WC2R 2LS, 伦敦;

4. 伦敦大学学院高级空间分析中心, W1T 4TJ, 伦敦; 5. 北京交通信息中心, 100073, 北京//第一作者, 硕士研究生)

摘要 基于地铁自动售检票系统连续一周的数据, 从多粒度、多层次、多角度对比分析了北京与伦敦地铁乘客的出行规律。结果显示: 北京与伦敦地铁乘客的出行频次分布相似, 但伦敦地铁的高频出行乘客更多, 而北京地铁的低频出行乘客更多; 伦敦地铁的总体换乘比例略低于北京, 更便捷, 且伦敦的短距离出行比例远高于北京; 北京地铁周末的通勤出行更多, 而伦敦市民从周五至周日的夜晚出行更多。地铁乘客的出现规律不仅与城市结构, 居民的工作生活状态有关, 对城市轨道交通的网络结构及运营管理也有重要的参考价值。

关键词 北京地铁; 伦敦地铁; 客流出行规律; 自动售检票数据; 对比分析

中图分类号 U293.13

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2018.03.035

Comparative Analysis of Passenger Trip Patterns Based on Metro AFC Data of Beijing and London

WANG Ting, CHEN Feng, WANG Zijia, CHEN Zhong, HUANG Jianling

Abstract By using one-week AFC data, the passenger trip patterns in Beijing metro and London metro are analyzed from multiple scales, multiple levels and perspectives. Results show that the distributions of metro passenger trip pattern are similar for both Beijing and London, but London features more high-frequency trips while Beijing metro shows more low-frequency trips. The total transfer ratio in London is slightly lower than that in Beijing, but more convenient for most short-distance trips. The weekend trips of Beijing residents are more than that in London, where most of the metro trips concentrate on evenings from Friday to Sunday. The passengers trip patterns are not only related to urban spatial structure, working places and life styles, but also have important reference value for urban rail transit networking and operation management.

Key words Beijing metro; London metro; passengers trip pattern; AFC (automatic fare collection) data; comparative analysis

First-author's address Research Center of Urban Rail Transit, School of Civil and Architectural Engineering, Beijing Jiaotong University, 100044, Beijing, China

自动售检票(AFC)系统和智能卡技术广泛应用于公共交通运输领域。其产生的海量数据成为目前国内研究的热点。文献[1]使用香港中心区8个地铁站连续一周的智能卡数据, 通过聚类和回归分析, 建立了站点客流的时空特征与其周边用地性质之间的关系, 最终确定了影响乘客出行模式的决定因素。文献[2]使用新加坡一周的公交和地铁 AFC 系统数据, 利用相关性分析和 Pagerank 算法度量了出行规律的变化性, 并基于社团挖掘得出城市功能分区。文献[3]使用日本高知县公交和有轨电车连续一个月的智能卡数据, 揭示了不同卡类型的持卡人出行时空规律和出行频率的差异, 基于此提出了公交线路优化建议。文献[4]使用北京公交智能卡数据, 对比分析了5种数据挖掘算法; 结果表明基于粗糙集算法的出行模式挖掘在精确性和有效性方面更胜一筹。文献[5]将北京市公交智能卡数据和出行调查数据相结合, 通过数据挖掘技术识别用户的工作区、居住区和通勤出行, 并以此评估职住关系, 证实了智能卡数据替代传统出行调查在城市结构时空分析中的可行性。

以往研究所使用的智能卡数据都具有基本的时空属性, 且在集计和非集计层面均作了充分研究。然

* 北京科学技术委员会资助项目(Z171100002217011)

而这些研究都针对单个城市展开,缺乏对多个具有可比性的国际大都市进行基于卡数据的对比分析。本研究选择北京和伦敦进行分析。

1 数据来源

本研究所用数据为伦敦和北京一周(周一到周日)的智能卡数据。对比分析的主要内容有出行频率、出行空间规律和时间规律。

2014年,伦敦地铁直接服务于860万常住人口。《伦敦交通需求调查报告》(见文献[6])显示:大伦敦区有30%左右的人口使用公共交通用于日常通勤,其中有80%的地铁乘客和90%的道路公交乘客使用智能卡;每天有900万条智能卡交易记录。截至2014年2月,伦敦地铁共有13条线路,400座车站。根据文献[7],2014年底,北京虽常住人口达2151万,但大部分位于偏远的郊区。北京地铁网覆盖区域主要在六环路以内,地铁服务的人口只有500万左右。在中心城居民各种交通方式(不含步行)构成中,城市轨道交通比例仅为19.4%;其中有85%的地铁乘客使用智能卡(一卡通)。截至2014年10月,北京地铁共有17条线路,233座车站。北京与伦敦的智能卡数据概括性统计如表1所示。

表1 北京与伦敦智能卡数据概括性统计

项目	北京	伦敦
周一客流量/万人次	457	345
周二客流量/万人次	442	362
周三客流量/万人次	456	367
周四客流量/万人次	458	366
周五客流量/万人次	488	376
车站数量/座	233	400
线路/条	17	13
地铁分担率/%	19.4	20.0
地铁线网规模/km	465	402
地铁线网覆盖面积/km ²	2 267	1 572
城市人口/万人	2 115	863

2 出行频率

出行频率指标包括乘客在一周工作日中使用地铁出行的天数(以下简为“周出行天数”),以及乘客每天使用地铁的次数(以下简为“日出行次数”)。出行频率可根据每次出行的唯一标识(卡号ID)分别统计得出。

2.1 周出行天数

周出行天数反映了乘客对地铁的需求稳定性。周出行天数越大,则需求稳定性越高。令周出行天

数为 $n(n=1,2,3,4,5)$,则一周工作日的AFC数据集用 D_n 表示, I_{D_n} 为 D_n 中表示卡号的字段,是每次出行的唯一标识; T_n 表示周出行天数为 n 的人数, P_n 表示周出行天数为 n 的乘客所占比例。定义集合运算 $A(\cap)B$ 返回结果为A、B中均存在元素的个数; $A(\cap)\bar{B}$ 返回结果为A中存在但B中不存在的元素个数。则工作日出行频率计算流程为:

(1) 输入工作日AFC数据集 $D_n(n=1,2,3,4,5)$ 。

(2) 分别提取数据集 D_n 中的字段 $I_{D_n}(n=1,2,3,4,5)$ 。

(3) 汇总 I_{D_n} 并统计独立ID的个数,即工作日出行总人数 $T = \text{COUNT}(\text{Distinct}(I_{D_n}))$;

(4) 用定义的集合运算分别求出 T_n ,并得 $P_n = T_n / T$ 。例如: $T_4 = I_{D_1}(\cap+)I_{D_2}(\cap+)I_{D_3}(\cap+)I_{D_4}(\cap-)I_{D_5} + I_{D_1}(\cap+)I_{D_2}(\cap+)I_{D_3}(\cap+)I_{D_5}(\cap-)I_{D_4} + I_{D_1}(\cap+)I_{D_2}(\cap+)I_{D_4}(\cap+)I_{D_5}(\cap-)I_{D_3} + I_{D_1}(\cap+)I_{D_3}(\cap+)I_{D_4}(\cap+)I_{D_5}(\cap-)I_{D_2} + I_{D_1}(\cap+)I_{D_3}(\cap+)I_{D_4}(\cap+)I_{D_5}(\cap-)I_{D_1}$

图1为北京与伦敦地铁乘客的周出行天数统计。由图1可见,北京与伦敦均 P_1 最大, P_5 次之。就 P_1 而言,北京 P_1 达45%,远高于伦敦。可见,北京地铁45%的乘客由低频使用者组成,而伦敦地铁只有35%左右。伦敦的 P_5 约比北京高6个百分点,即伦敦地铁的高频乘客占比较多。结合每日地铁客流量分析还可以发现,工作日地铁客流量变动较小。因此,北京与伦敦地铁的乘客组成均处于动态稳定,但伦敦地铁的高频乘客较多,而北京地铁的低频乘客更多,故伦敦地铁乘客的需求稳定性较高。

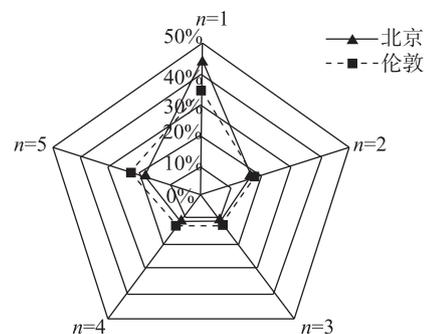


图1 北京与伦敦地铁乘客的周出行天数统计

2.2 日出行次数

日出行次数反映乘客日常使用地铁的频率。可通过构建每位乘客在一天内使用地铁的出行链来计算其日出行次数。

图2为北京及伦敦地铁乘客日出行次数统计分析。由图2可见,无论是北京还是伦敦,日出行次数 $k=2$ 时的乘客所占比例最高,均超过50%且基本持平。这在一定程度上反映了乘客在工作日往返出行的通勤特点。北京与伦敦周末日出行次数为2的乘客比例均低于工作日,且北京降低的幅度较大。日出行次数为1时,北京与伦敦的乘客比例差异显著。北京日出行次数为1时乘客比例接近伦敦的2倍。

为了进一步分析,结合同日公交卡数据甄别出每天只使用1次地铁出行的乘客还使用了道路公交车出行的比例(见图3)。由图3可见,北京地铁日出行次数为1的乘客还使用道路公交车的比例显著大于伦敦。这反映出北京地铁与道路公交车的互补程度高于伦敦,也从侧面表明伦敦地铁对地面交通的可替代性显著优于北京。

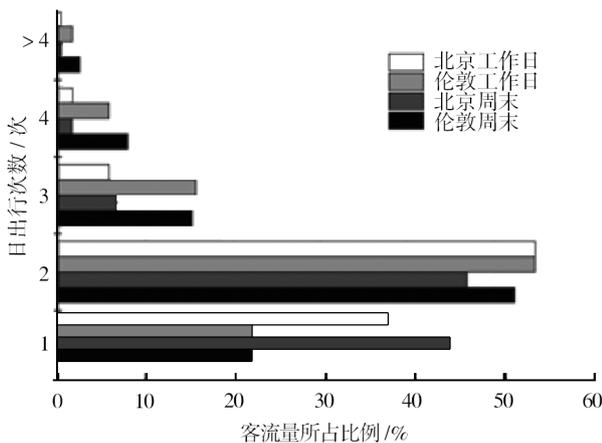


图2 北京及伦敦地铁乘客日出行次数统计分析

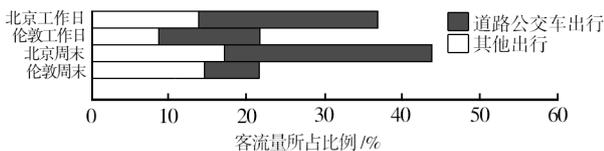


图3 地铁日出行次数为1的乘客使用其它交通方式情况

此外,无论是工作日还是周末,伦敦日出行次数大于2的乘客比例均远大于北京,即伦敦地铁日常高频使用者居多。

3 出行空间规律

乘客的空间出行特性指标主要包括换乘次数和出行距离。根据地铁AFC系统中的某乘客OD(起讫点)数据可确定该乘客的路径,相应的出行距离即为该路径的长度。若该路径包含不同线路,则发生换

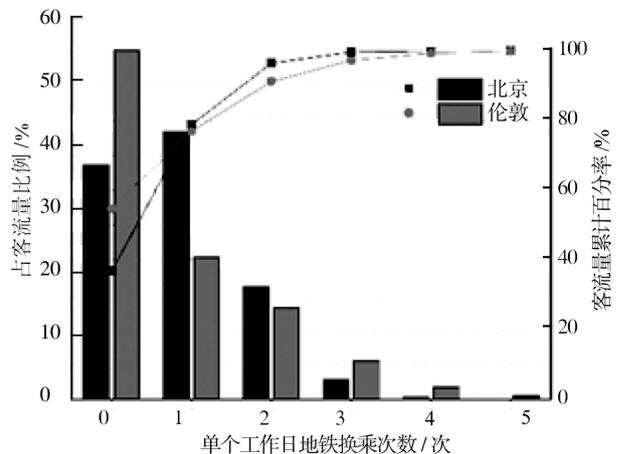


图4 单个工作日地铁换乘次数分布

乘行为。于是可计算地铁乘客的换乘次数。

3.1 换乘次数

乘客换乘次数反映其OD点之间的交通便捷程度。图4为北京与伦敦地铁乘客单个工作日换乘次数分布。由图4可知,伦敦地铁无需换乘的乘客比例达55%,远高于北京,而北京地铁需换乘1次的乘客比例约为伦敦的2倍;由累计曲线可以看出:北京与伦敦均有80%的乘客至多换乘一次即可达到,伦敦多次换乘(换乘次数>2次)的乘客比例略高于北京,北京地铁工作日的乘客平均换乘次数为0.883次,伦敦的则为0.805次。

综合结果表明,伦敦地铁便捷性略高于北京。这是由于伦敦地铁线网包含多条放射线,可从郊区直达中心区,而北京地铁网络基本保持道路网的结构,呈棋盘状,外围前往中心区一般需一次以上的换乘。

3.2 出行距离

北京与伦敦的空间尺度和线网规模差异较大。为分析北京与伦敦地铁乘客的出行距离,定义北京相对于伦敦的比例系数 α_{1-2} 为:

$$\alpha_{1-2} = \frac{1}{3} \times \left[\sqrt{\frac{S_1 - S_2}{S_1} + \frac{L_1 - L_2}{L_1}} - (1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}) \right]$$

$$q_1 = q_0 (1 + \alpha_{1-2})$$

式中:

S_1 ——北京地铁覆盖面积,为2 267 km²;

S_2 ——伦敦地铁线网络覆盖面积,为1 572 km²;

L_1 ——北京地铁线网络长度,465 km;

L_2 ——伦敦地铁线网长度,402 km;

ρ_1 ——北京地铁线网密度,0.205 km/km²;

ρ_2 ——伦敦地铁线网密度,0.255 km/km²;

q_1 ——北京根据比例系数修正后的累积百分率;

q_0 ——北京初始计算的累积百分率。

代入数据得 $\alpha_{1-2} = 0.16$, 则 $q_1 = 1.16 q_0$ 。

图5为北京与伦敦地铁工作日和周末的出行距离差异。伦敦短距离出行($< 10 \text{ km}$)量远大于北京。从图5累计曲线可以看出:伦敦地铁超过91%的乘客是短距离和中短距离($10 \sim 20 \text{ km}$)出行,而在北京此类乘客仅占81%(修正前为70%)。其原因在于伦敦的职住关系更加平衡,伦敦的中短距离出行比例远高于北京。此外,由累计曲线可以看出:工作日与周末出行距离略有变化,且两个城市变化规律相反。其中,北京工作日中短距离和中长距离($20 \sim 30 \text{ km}$)出行比例稍大于周末,而伦敦工作日的短距离和中短距离出行比例稍小于周末。

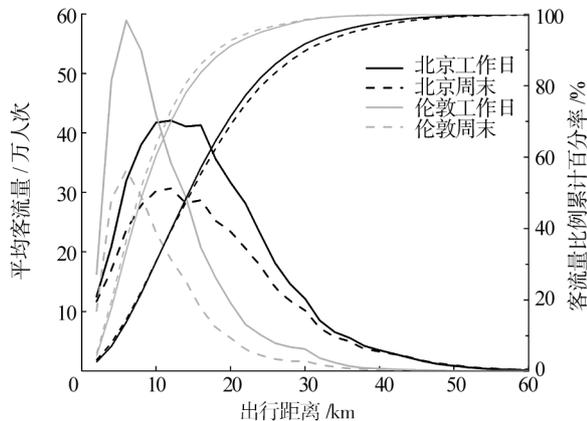


图5 工作日与周末出行距离分布

4 出行时间规律

出行时间规律研究基于 AFC 数据进出站的时间字段,主要包括对一周全网客流时间分布、出行时间、站外停留时间和多次出行乘客进站时间的研究。出行时间为乘客每一次出行进出站的间隔时间。例如,乘客从 A 站进站的时间为 t_A ,从 B 站出站的时间为 t_B ,则乘客的出行时间为 $t_B - t_A$ 。当乘客一天之内,先由 M 站进站,由 B 站出站,再由 B 站进站,由 N 站出站,则从 B 站出站与从 B 站再次进站之间的间隔时间为站外停留时间。

4.1 时间分布规律

将客流量按照一周的时间序列每 10min 间隔统计,得到北京与伦敦连续一周的地铁客流量时间分布(见图6)。

由图6可见:①两个城市的工作日晚高峰客流均呈现出多峰特征。这表明两个城市的通勤乘客下班时间均具有一定弹性。②两个城市周末客流量的

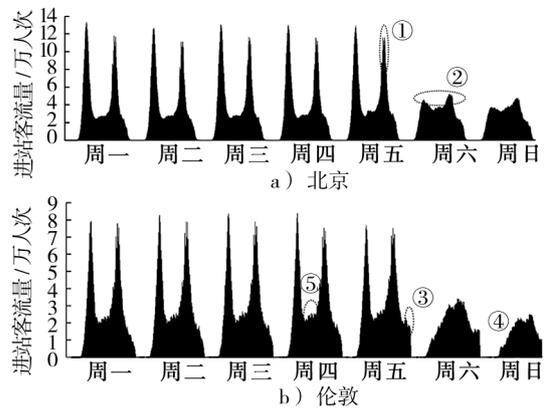


图6 一周客流时间分布

高峰规律存在较大的差异,其中北京的周末客流量具有较为明显的双峰特征。说明北京地铁乘客中周末工作出行的仍较多。③伦敦周五 24:00 处出现客流截断,且在周六与周日也存在这一现象,而北京周末夜间客流量变化较平缓。这表明伦敦地铁乘客在周五至周末晚上的活动强度较大。④伦敦客流量周六与周日峰值有明显的落差。周末的出行一般与购物、休闲、娱乐目的相关,而伦敦市的部分商户会在周日歇业,故周日客流量显著减少;⑤伦敦工作日午间(11:00—13:00)的客流量波动性较大,说明伦敦午间乘客出行时间较为分散。

4.2 出行时间

对乘客的出行时间进行统计分析,结果表明两个城市均有超过 99%的地铁乘客单次出行时间在 120 min 内。分析单次出行时间在 120 min 以内的客流量比例统计见图7。

由图7可以看出,伦敦超过 60%的地铁乘客单次出行时间在 30 min 内,而北京地铁单次出行时间在 30 min 内的乘客比例仅仅略高于 40%;此外,北京地铁多数乘客单次出行时间位于 30 min 到 90 min,约占乘客总量的 55%。图7还可看出,北京地铁工作日与周末的乘客单次出行时间的差异较明显,且工作日的乘客出行时间较短。这与图5的出行距离规律一致。

4.3 站外停留时间

站外停留时间的统计时间间隔为 1 h。根据单个乘客站外停留时间长短可识别通勤客流。如图8所示,北京与伦敦工作日乘客的最大站外停留时间均为 9~10 h,周末乘客的最大站外停留时间均为 1~2 h。这表明北京与伦敦的工作日客流均以通勤出行为主,周末客流均以休闲、购物、娱乐出行为主。从累

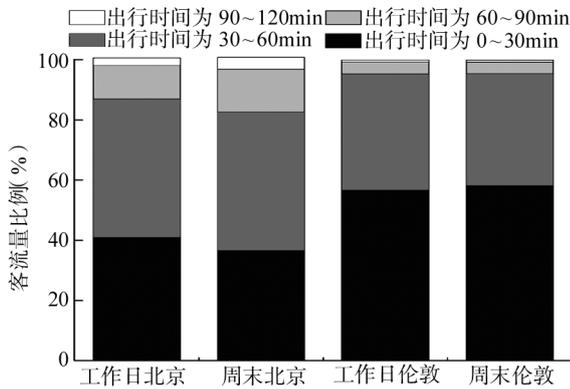


图7 出行时间客流量比例

计曲线可以看出,北京与伦敦工作日变化趋势趋同,周末差异较大,但伦敦工作日站外停留时间少于6 h的客流量比例约占50%,北京则接近40%。可见,工作日伦敦地铁非通勤乘客比例相对较高,而周末北京地铁站外停留时间为7~11 h的客流量比例更高。这与图6中北京乘客周末加班出行比例大的规律一致。

4.4 进站时间分布

一天中多次出行(出行次数>1次)乘客的进站时间分布矩阵见图9。统计时间段为05:00—24:00,

统计时间间隔为1 h。矩阵下三角单元颜色越深表示客流量越大。从工作日进站时间分布矩阵可以看出北京客流最多的两次进站时间段分别为7:00—8:00和17:00—18:00,而伦敦客流最多的两次进站时间段分别为9:00—10:00点和18:00—19:00。究其原因,2月份的伦敦一般早上8:30天亮,故其乘客首次进站时间较晚;而且伦敦工作时间普遍较北京短。北京与伦敦周末客流进站时间分布矩阵差异较大。北京周末以工作为目的的出行较多,伦敦周末购物娱乐出行较多。从北京工作日与周末的多次出行乘客进站时间分布矩阵可以发现,11:00—12:00是一天出行强度的分界线。

5 结语

本研究利用一周的AFC数据,多粒度、多层次、多角度地分析了北京与伦敦地铁乘客的出行频率、出行空间规律和时间规律,主要得到以下结论:

(1) 工作日出行天数的对比表明,伦敦地铁乘客的需求稳定性较高;出行次数对比结果表明,伦敦地铁日常高频使用者居多。

(2) 伦敦地铁的便捷性略较北京高,且伦敦的

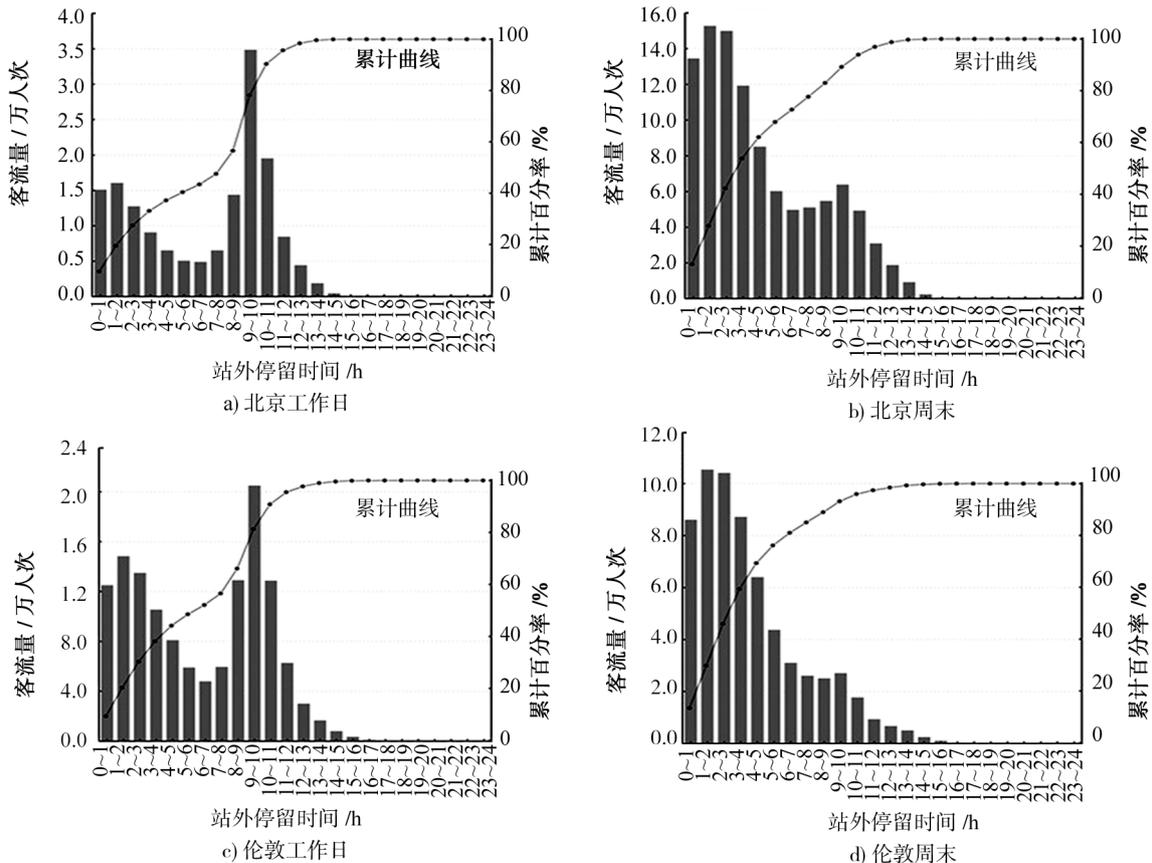


图8 工作日与周末停留时间分布

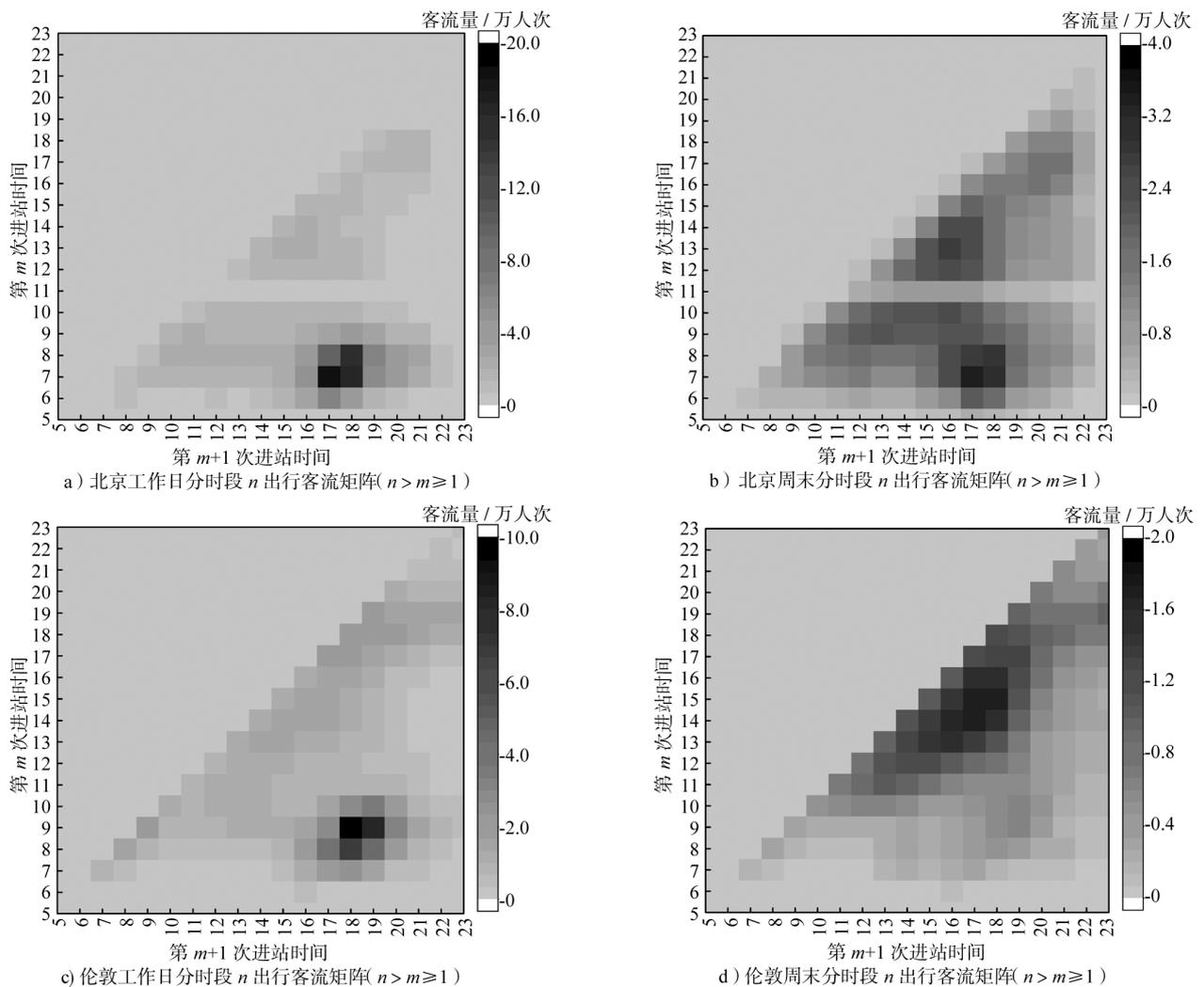


图 10 多次出行进站时间分布矩阵

短距离出行比例远高于北京。

(3) 北京与伦敦通勤乘客下班时间均有一定弹性。在客流组成中,北京地铁工作日的通勤客流比例较高。

地铁乘客出行规律不仅与城市结构、居民的生活和工作状态有关,与城市轨道交通网络互联互通程度及运营管理模式的关系更是密不可分。基于AFC数据的进一步研究应着重挖掘出行规律与城市轨道交通线网结构和运营管理间的内在联系,从而对区域轨道交通线网规划和运营管理提供更加科学合理的指导。

参考文献

- [1] WANG WL, LOSM LIUSB. Aggregated metro trip patterns in urban areas of Hong Kong: Evidence from automatic fare collection Records [J]. Journal of Urban Planning and Development, 2015, 141(3): 1.
- [2] ZHONG C, ED M, STEFAN M, et al. Measuring variability of mobility patterns from multiday smart-card data [J]. Journal of Computational Science, 2015, 9: 125.
- [3] NISHIUCHI, KING J. TODOROKI T. Spatial-temporal daily frequent trip pattern of public transport passengers using Smart card data [J]. International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, 2012, 11(1): 1.
- [4] MA X. Mining smart card data for transit riders' travel patterns [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2013, 36: 1.
- [5] LONG Y, THILL J-C. Combining smart card data and household travel survey to analyze jobs housing relationships in Beijing [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2015, 53: 19.
- [6] TRANSPORT FOR LONDON. Travel in London, Supplementary Report [R]. London: London Travel Demand Survey (LTDS), 2011: 15.
- [7] 北京交通发展研究中心. 北京交通发展年度报告 [R]. 北京: 北京交通发展研究中心, 2015: 4.

(收稿日期: 2016-07-20)