

引用格式:高楹,宋辞,舒华,等.北京市摩拜共享单车源汇时空特征分析及空间调度[J].地球信息科学学报,2018,20(8):1123-1138. [Gao Y, Song C, Shu H, et al. Spatial-temporal characteristics of source and sink points of Mobikes in Beijing and its scheduling strategy[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(8):1123-1138.] DOI:10.12082/dqxxkx.2018.180272

北京市摩拜共享单车源汇时空特征分析及空间调度

高 楹¹, 宋 辞², 舒 华², 裴 韬^{2*}

1. 首都师范大学燕都学院, 北京 100048; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101

Spatial-temporal Characteristics of Source and Sink Points of Mobikes in Beijing and Its Scheduling Strategy

GAO Ying¹, SONG Ci², SHU Hua², PEI Tao^{2*}

1. Honours College of Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Sharing bicycles is an important tool for solving the "last mile" travel problem in a city. However, the imbalance between supply and demand of sharing bicycles occurred frequently, which leads to significant spare of bicycles and obvious inconvenience for users. The key to solve this problem is to understand the spatial and temporal distribution characteristics of sharing bicycles' supply and demand. In this case, this study defines the intensive "source" and intensive "sink" points of sharing bicycles, and uses Mobikes cycling data and land use type data to analyze the distribution characteristics of the intensive source and intensive sink points during the workdays and weekends, as well as the morning and evening peaks. Combined with the land type information, we further analyze the characteristics of sharing bicycles' usage under different land use types and propose a local scheduling model based on spatial neighborhood. Results show that under different land use coverage, the distribution of intensive source and intensive sink points of sharing bicycles show significant spatial and temporal heterogeneous patterns: (1) The usage of sharing bicycles during work days is obviously higher than weekends, and the distribution of the intensive source and intensive sink is obviously different among different land use types. For example, the net inflow and outflow density in areas such as residential, commercial, financial lands are greater than those of green areas; (2) In the morning and evening peak periods, the source and sink attributes of the same area are always showing a converse pattern. For instance, areas with offices such as education and scientific research lands and commercial and financial lands will have the characteristics of "morning sinks and evening sources", while the residential lands will be "morning sources and evening sinks"; (3) During the morning and evening peak periods of weekdays and weekends, there are also differences in characteristics of the sources and sinks of the same type of land use. For instance, the proportion of the intensive sources and intensive sinks will obviously decline in the office area on weekends. Based on the results above, this paper proposes a local optimized scheduling model. It is found that the model can effectively reduce the imbalance of bicycles' space allocation and increase the resource's utilization and the convenience of people's travelling.

收稿日期 2018-06-04; 修回日期: 2018-06-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41421001、41525004)。[**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41421001, 41525004.]

作者简介: 高 楹(1997-), 男, 本科生, 主要从事 GIS 空间分析理论及应用。E-mail: thankyoumyfriend@126.com

*通讯作者: 裴 韬(1972-), 男, 博士, 研究员, 主要从事地理大数据挖掘方面的研究。E-mail: peit@reis.ac.cn

Key words: Mobikes; source and sink points; spatial-temporal characteristics; spatial scheduling; Beijing

***Corresponding author:** PEI Tao, E-mail: peit@lreis.ac.cn

摘要 共享单车是解决城市出行最后一公里的重要工具。然而,共享单车在使用过程中出现了供需时空失衡的现象,导致部分区域无车可用,而另一些区域却车满为患。这一现象不仅给用户带来不便,同时也降低了单车周转效率。解决供需失衡问题,关键在于探究共享单车供需失衡的时空分布特征。本文定义了共享单车的“源”、“汇”点,采用2017年5月10日至2017年5月16日北京市摩拜单车数据以及土地利用分类等多源数据,分析了共享单车工作日与周末,以及早、晚高峰期间强源、强汇点的分布特征,并结合土地类型信息分析了不同用地类型的单车使用模式,从而进一步提出了共享单车的空间调度模型。结果显示,在考虑不同土地利用类型的影响下,摩拜共享单车强源汇点分布模式具有明显的时空异质性:① 工作日单车使用量明显高于周末,且不同土地利用类型的源汇分布显著不同,如居住用地、商业金融用地等地净流入、流出密度更大,绿地等地区则相对较小;② 对比早晚高峰期间,同一地区的单车使用源汇模式极可能相反,如教育科研用地、商业金融用地等带有办公性质的地区会有“早汇晚源”的特征,而居住用地则是“早源晚汇”;③ 同一类土地利用在工作日与周末的早晚高峰期间,单车使用的源汇特征亦存在差异,如办公性质的地区在周末时源汇比例会明显下降。基于上述结果,本文提出了一种局部优化的调度模型,并通过实际数据进行了检验。该模型在一定程度上可以解决车辆空间分配不均衡的问题,提高城市共享资源使用率,增加人们出行的方便程度。

关键词 摩拜共享单车;源汇点;时空特征;空间调度;北京

1 引言

共享单车于2016年推出至今,已得到快速发展,据国家交通部统计,共享单车一天活跃用户量高峰时已近七千万^[1]。作为解决出行“最后一公里”难题的有效手段,共享单车借助无桩式的设计,成功避免了有桩式公共自行车借还车不便的缺陷,提高了公共出行效率^[2]。然而,共享单车在高速发展的同时也出现了诸多问题。对于管理者而言,最大的困难之一是如何在较小成本下尽可能多的保证用户有车可用^[3],其核心问题在于如何使区域的共享单车供需达到平衡。要解决该问题,必须掌握共享单车的供需状况以及影响因素,从而提出有效的考虑成本的调度优化策略。

相对于有桩“公共自行车”,共享单车的出现较晚。目前相关研究大多关注有桩“公共自行车”的资源分配问题。这部分研究大致可分为2类:

(1)探究公共自行车用车量的影响因素。研究集中在分析建成区类别、用户属性以及其它相关因素对于站点用车数量的影响,并估算不同地区的自行车需求量,以对站点的布局、规模提供参考。许多研究表明,建成区类别会对公共自行车的用车量产生影响^[4-7]。例如,El-Assi等^[8]利用经验模型判断多伦多地区的公共自行车需求量是否与周围建筑有影响,研究表明工作人口的密度、接近公交枢纽的程度、自行车道的宽度、兴趣点(零售商店、餐馆、公园等)的数量与车站的需求呈正相关;在此基础

上,Zhang等^[9]和Li等^[10]还发现车站的位置、大小、服务范围是否重叠也会对车辆的需求量产生影响,若在车站300 m内新建一个空车站,会提高车站的供需比。国内关于公共自行车用车量的研究则相对较少,罗桑扎西等^[11]通过构建缓冲区并采用多元回归的方法,探究了南京市公共自行车的用车量与不同建成因子之间的关系,研究发现公共自行车的使用存在明显的时空差异,且建成环境对不同时段的影响存在较大差异。

(2)探索如何通过合理调度实现公共自行车的供需平衡。主要关注如何能够快速、合理地实现车辆调度以满足用户的实时用车需要。目前有关车辆调度的研究主要是结合启发式算法实现路径优化^[12-15],其中按是否考虑有时间要求又可分为静态和动态2种研究思路。静态的调度路径优化即不考虑时间因素,只通过某一时刻站点存车数量来判断是否进行调度,并以调配成本最小化为调度目标,如柳祖鹏等采用改进的蚁群算法,以武汉市关山光谷片区的24个自行车站点为例,求解得到了最优调度回路^[13]。而动态的调度路径优化则考虑了时间因素,如遇早晚高峰有大量的借还车需求时,需通过设定一个调配时间窗,使调度尽可能地在租赁点所要求的时间窗内完成,令用户的不满意率最低。丁秋雷等^[14]提出了一种混合蚁群算法,较为有效地求解了有时间窗的调度问题。而在实现的方法上,调度算法的研究方向又可分为遗传算法、蚁群算法等,葛显龙等^[16]设计了针对车辆调度问题的

遗传算法,并改进了传统的交叉运算方法,提高了遗传算法的寻优能力。张建国等^[17]在高峰时段建立基于滚动时域的公共自行车车辆调度路径优化模型,并运用蚁群算法近似求解不同时段车辆调度路径,缩短了调度路程并减少了调度费用。

综上所述,已有研究主要关注公共自行车站点的用车影响因素以及站点之间的调度方法。由于共享单车不存在集中的站点,车辆的起止位置仅与用户个人的出行目的有关,因此建成区对共享单车使用量的影响将有所变化^[18]。此外,同样因共享单车不具有固定的站点,而是分散于城市中,导致其形成的网络极其复杂;而其流动性更强的特点也导致存车数量难以实时监控。另外,不同地区之间用车数量存在明显差异。基于共享单车的上述特征,原有基于站点数据的分析方法和基于小型网络的全局优化调度策略很难适用于目前的共享单车。因此,为了系统研究北京市摩拜单车供需的时空分布特征及影响因素,并提出针对性、可行性高的优化策略,本文针对共享单车的特点,提出将北京市按照网格划分,分别统计不同网格内共享单车的流入和流出,以定量揭示共享单车的源汇分布。并结合北京市土地利用分类数据,判断各个土地类型对共享单车使用情况的影响。在此基础上,设计了一种新的基于网格化数据和土地利用类型数据的局部共享单车资源调度方法。

2 数据与方法

2.1 数据源

本研究使用的数据包括共享单车数据和北京市土地利用分类数据。共享单车数据采用2017年5月10日至2017年5月16日期间北京市内所有产生骑行记录的摩拜单车数据,共计182万余条。将起止点坐标可视化并与北京市边界对照后,表明数据在空间范围上覆盖了整个研究区域,不存在缺失情况。通过数据发现,北京市平均每天被使用的摩拜单车数量约为180 159辆,7天中被骑行的车辆总数共计435 504辆。另外,通过查询北京市的天气情况可知,该段时间北京市的天气以晴好为主,空气质量亦较好^[19],因此该段时间的骑行数据基本可以全面地反映北京市摩拜单车的真实使用情况。

数据中字段包含用户身份标识号、车辆标识号、车辆类别、骑行标识号、骑行起始时间、起始坐

标以及终止坐标(地理坐标系为WGS 84)。起始和终止坐标用网格中心点坐标表示,每个网格的东西向与南北向的间隔相等,为4.9428"。经投影转换后,每个网格东西向与南北向长度分别约为115 m和155 m。

为了研究不同土地利用类型对单车使用的影响,收集了北京市城区2017年的土地利用数据。土地利用类型共分为15类,如图1所示。将该土地利用类型图的范围作为本研究的研究区范围。土地利用数据是基于地理空间数据云<http://www.gscloud.cn/>网站下载的Landsat 8 OLI_TIRS遥感影像数据(2017年11月15日的Landsat 8 OLI_TIRS遥感影像数据(数据标识LC81230322017319LGN00,条带号123,行编号32,云量0.02;pan波段分辨率15 m,多光谱波段30 m,热红外100 m),在《北京市城市总体规划图(2004年-2020年)》中心城用地规划图和土地利用分类基础上,结合实地调研和地面验证,对2017年北京城区土地利用进行解译完成。

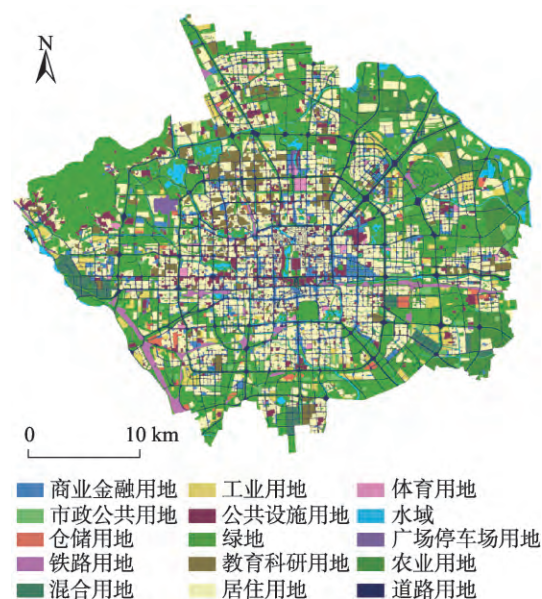


图1 研究区土地利用分类图

Fig. 1 Land use in research area

2.2 数据预处理

为了研究单车骑行的时空规律,需要估算各车辆的骑行时间。为此,本文采用骑行速度与起止点间的距离来估算出骑行时间。考虑到北京市城区道路的走向多集中为正南正北或正西正东^[20],因此,起始点和终止点之间的距离定义采用了曼哈顿距离,骑行时间的计算公式如下:

$$t_i = \frac{|D_{x(i)} - O_{x(i)}| + |D_{y(i)} - O_{y(i)}|}{v} \quad (1)$$

式中: t_i 为估计的第 i 次骑行的时间; v 是统一设定的速度, 本文共享单车的速度假设为 10 km/h; $|D_{x(i)} - O_{x(i)}| + |D_{y(i)} - O_{y(i)}|$ 为第 i 次骑行的起始点和终止点之间的曼哈顿距离, $|D_{x(i)} - O_{x(i)}|$ 和 $|D_{y(i)} - O_{y(i)}|$ 分别为起点和终点之间的东西、南北方向的距离差的绝对值。

2.3 源汇点的识别

研究区网格可由净流入/出值的不同分为 3 类: 源点(净流出值 > 0)、汇点(净流入值 > 0) 和平衡点(净流入值 $= 0$)。前两类点表明车辆在该区域发生了汇聚或流失, 这是由于骑行行为时空分布的不均衡性造成的^[21]。为得出不同时期以及不同路段的车辆汇聚或流失规律, 本文重点分析具有较高净流入和较高净流出的强汇点和强源点。强源点和强汇点的确定需要从以下 3 个方面考虑: ① 需要考虑流入与流出的总量; ② 需要考虑流入和流出的比例; ③ 需要考虑源和汇量时序变化的稳定性。

流入与流出的总量反映了一个地区车辆可能增加或减少的数量: 如果某地区流入与流出的车辆总数较少, 则证明该地区增加或减少的车辆必然更少。相反, 若总数较多, 则意味该地可能会产生明显的车辆汇聚或流失。因此, 强源点和强汇点应具有较高的流入或流出数量。为提取出具有这样性质的网格, 本文将工作日网格流入流出总量的阈值设为总研究时间内所有网格中的流入流出分布的中位数(Q2), 具体不同时间的阈值如表 1 所示。

强源点和强汇点的另一衡量指标是净流入率或净流出率^[22], 其计算公式为:

$$P_i = \frac{(D_i - O_i)}{(D_i + O_i)} \quad (2)$$

表 1 不同时段强源汇车辆数阈值

Tab. 1 The thresholds of bicycles in different period

时段	车辆数阈值
工作日	38
周末	10
工作日早高峰	19
工作日晚高峰	20
周末早高峰	4
周末晚高峰	5

式中: P_i 所计算的是第 i 个网格在研究时段内的净流入(出)率; D_i 和 O_i 分别代表该网格驶入和驶出的共享单车的数量。 P 值的正负体现了该网格内车辆的流入或流出, 而 P 值越接近 1 或 -1 则意味该网格的车辆流入或流出的现象越明显。强源点强汇点需要具有明显的车辆流出或流入的趋势, 因此本文将净流入(出)率的阈值设为了 ± 0.25 。

最后, 强源点和强汇点在研究时段内的源、汇量应是稳定的。即在相应的研究时段内(针对工作日或周末研究, 研究时段为天; 针对早晚高峰研究, 研究时段为早高峰或晚高峰时段), 强源点、强汇点都会有车辆流出或流入。在这一假设下, 本文对数据做了进一步筛选, 最终确定出不同时段的强源、强汇点。

2.4 研究方法

本文首先借助北京市土地利用数据, 对定义的强源、强汇点的分布模式进行分析, 得出强源汇点与城市用地类型之间的关系。进一步根据源汇点数据具有的网格特征, 将原始数据重采样后, 设计了一个针对共享单车的基于网格的调度算法, 并对市区内部的工作日内的所有源汇点数据进行实验, 实现网格间的车辆调度。最后再利用已得到的强源、强汇点与城市用地类型之间的关系, 并结合网格间单车调度的原理, 提出了一个基于先验知识的网格单元内调度的方法。具体研究思路由图 2 所示。

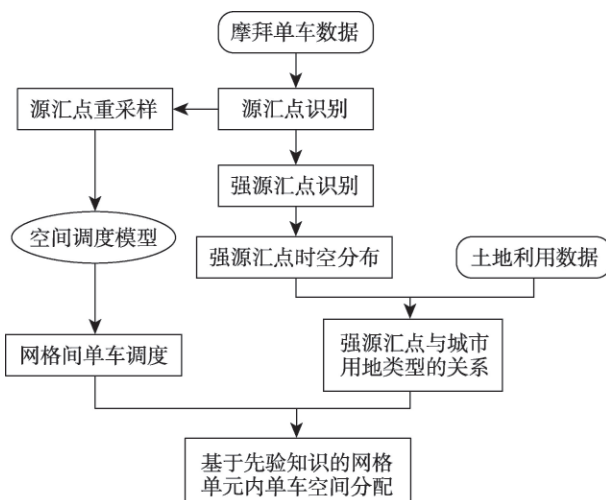


图 2 研究流程

Fig. 2 The process of research

3 源汇点时空分布特征分析

3.1 工作日与周末强源汇点空间分布特征

自2017年5月10日至2017年5月16日,研究区内共享单车骑行人数分别为220 612、225 759、220 228、181 217、191 089、231 919和239 565人次,其中5月13、14日为周末。由此可知周末的共享单车用车次数明显少于工作日的用车次数,进一步推知这两个时段的用车模式可能存在明显差异,因此本文针对工作日与周末分别进行了强源汇点的分析。

首先将工作日与周末的强源汇点进行可视化分析。图3为北京市的强源汇点分布情况,利用强

源汇点的净流入与净流出率进行分级显示可发现强源汇点的分布模式具有明显的时空异质性。由图3(a)、(b)可知,工作日期间研究区外围有更明显的强源汇集现象,而对比图3(c)、(d)则可发现,这一模式在周末时相对减弱,市区中心的强源汇点比例增加。

图4、5和表2展示了工作日和周末不同土地利用斑块上的强源汇点数量信息。图4结果表明,工作日时,居住用地内的强源、强汇点数量比例最高,分别为38.06%和39.86%,远高于居住用地面积所占的比例24.14%。而商业金融用地、教育科研用地和道路用地的强源汇点数量的比例也

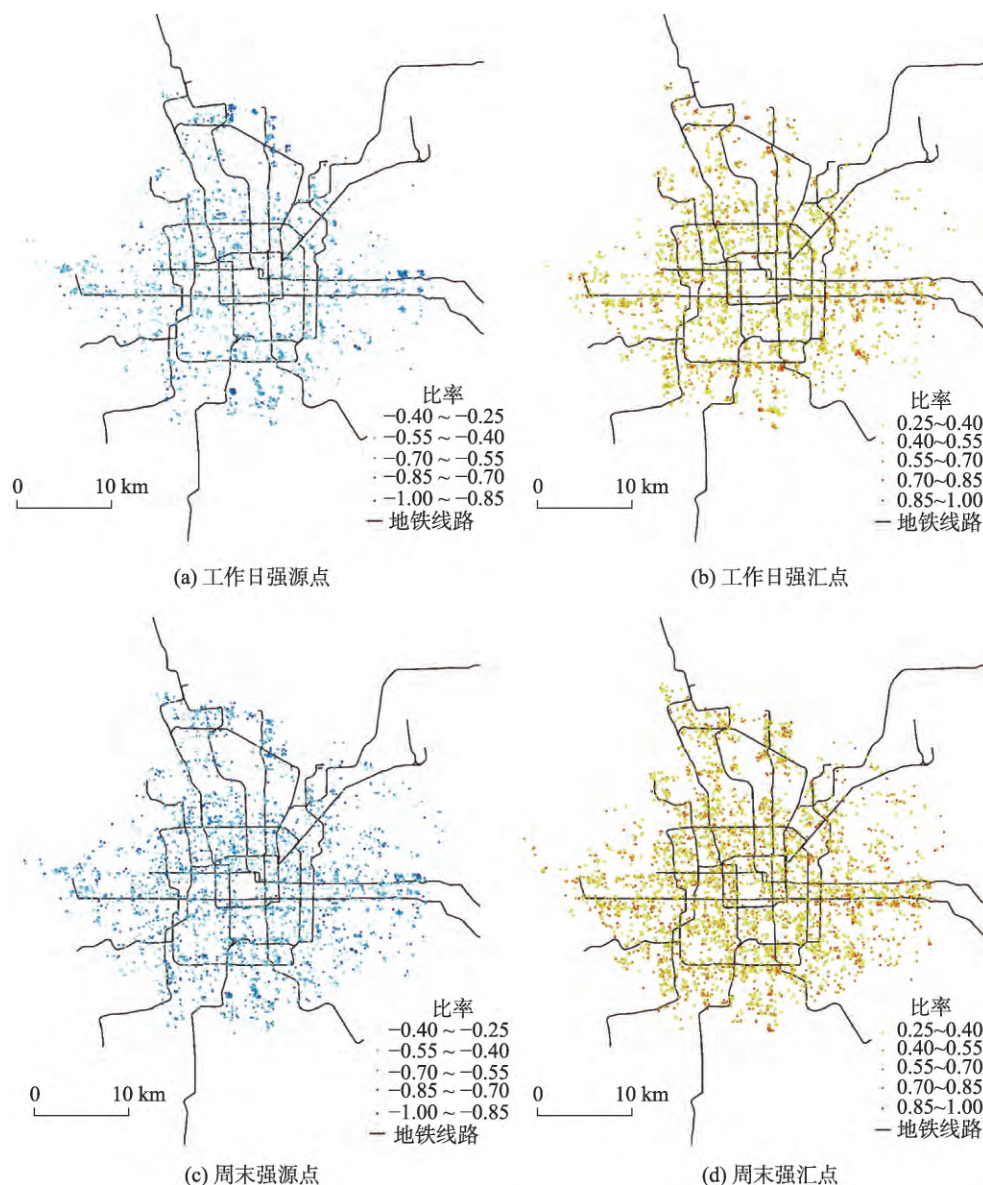


图3 研究区共享单车强源、强汇点分布图

Fig. 3 Intensive source and sink points distribution of the sharing bikes during weekends in research area

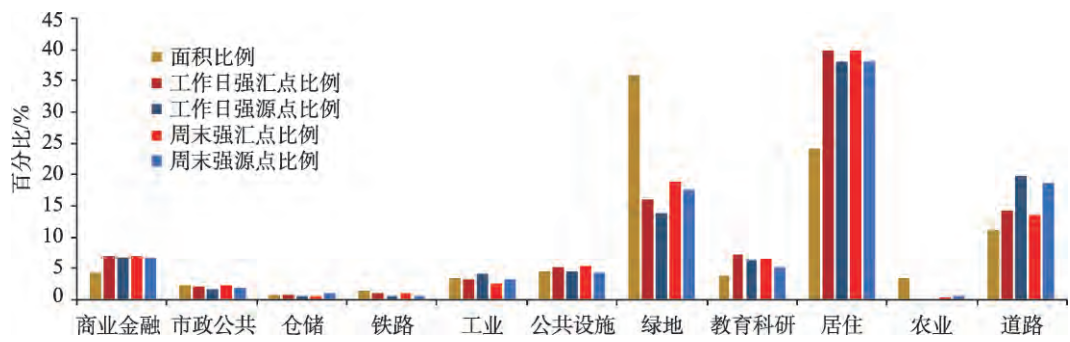


图4 不同土地利用中强源点、强汇点数量比例

Fig. 4 The ratio of intensive source, intensive sink points in different land use

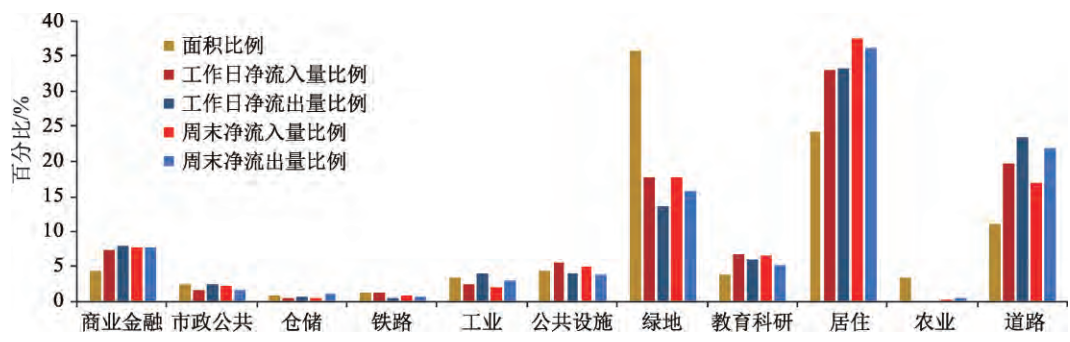


图5 不同土地利用中及净流入、净流出比例

Fig. 5 The ratio of net inflow and net outflow in different land use

表2 不同土地利用中强源点的平均净流出量及强汇点的平均净流入量

Tab. 2 The average net inflow of intensive sink and average net outflow of intensive source points in different land use

土地利用类型	工作日强汇点平均净流入车辆	工作日强源点平均净流出车辆	周末强汇点平均净流入车辆	周末强源点平均净流出车辆
商业金融用地	46.07	46.84	12.45	12.69
市政公共用地	35.33	55.86	11.60	9.66
仓储用地	31.25	41.33	9.65	13.87
铁路用地	56.73	31.94	9.41	10.75
工业用地	35.11	38.19	8.45	10.35
公共设施用地	48.22	36.08	10.69	9.64
绿地	48.85	40.52	10.56	9.77
教育科研用地	41.18	38.48	11.26	10.95
居住用地	36.76	35.93	10.59	10.41
农业用地	34.00	21.50	7.50	6.50
道路用地	61.02	48.58	13.90	12.80

普遍高于其面积所占的比例,三者的面积比仅有4.29%、3.77%以及11.00%,而其强源、强汇点数量比则分别为:6.88%和7.05%、6.38%和7.17%、19.81%和14.26%。与之相反,绿地和农业用地的强源、强汇点数量的比例分别为13.84%和16.01%、0.16%和0.08%,明显低于这些地区面积的比例:35.86%和3.29%,这也反映了绿地、农业

用地的车辆使用相对较少。公共设施用地、市政公共用地以及工业用地,其强源、强汇点数量比则与其土地面积比大致相等。

周末时,居住用地强源、强汇点比例与工作日时相比基本相同,分别为38.07%和39.84%,这说明居住用地中的高强度用车地区在工作日与周末都是稳定的。此外,工业用地、商业金融用地、公共设

施用地和教育科研用地的强源、强汇点比例均有所下降,表明这些带有办公性质的地区在周末时并不是人们出行的主要起始地和目的地。而绿地较工作日相比强源汇点比例都有了很大的上升,表明周末人们有更多的时间和机会到绿地区休闲,绿地类型斑块上的用车区域明显增多。

图5统计了各种类型土地利用斑块上的净流出和净流入车辆的数量比例。可以看出,净流出或净流入数量比例的分布情况与源汇点的分布模式类似。有意思的是,道路用地的净流出与净流入的模式在工作日和周末时呈现了明显相反的趋势,其净流出比一直大于净流入比,属于“出”大于“入”。这表明无论在何时,道路用地都不断有车辆减少。而居住用地的净流入与净流出量比虽在工作日基本相等,但在周末时却呈现了“入”大于“出”的现象,结合道路的净流入净流出特征,这可以对“僵尸车”的现象进行解释。而在工作日和周末,车辆流入比例一直大于流出比例的则有绿地、教育科研设计用地和公共设施用地等地。

表2为周末和工作日各类型土地利用斑块中强源汇点的平均流入和流出量,表明了不同用地类型上的强源汇点的流出、流入的集中程度。其中,居住用地、商业金融用地、工业用地和教育科研用地上强源汇点的净流入或净流出的自行车数量比例在工作日和周末并无明显差异,但不同土地利用类型之间的数值却存在显著的差异,如居住用地的平均净流入、净流出量较低,商业金融用地较高。这种差异主要是由于地区及用户属性的差异造成的,如商业金融用地的人群更为集中,需求量亦大,而居住用地并不如商业用地繁忙,因此其源汇点的集中流入、流出程度不如商业金融用地明显。

此外,部分用地的平均流入流出量在工作日与

周末发生了显著的变化,如市政公共用地和铁路用地。铁路用地由工作日的“入”大于“出”变为了“出”大于“入”,而市政公共用地则由“出”大于“入”变为了“入”大于“出”。由于市政公共用地中包含了汽车站,因此上述现象可以反映出火车站与汽车站在工作日和周末具有的不同属性。这可为在不同日期,不同土地利用的车辆摆放的密集程度提供参考。

上述现象表明,工作日与周末共享单车用户的用车数量以及用车习惯存在显著差异,在周末时,共享单车作为通勤工具的性质有所减弱,而作为休闲娱乐的代步工具的性质有所增强,且用车总数明显小于工作日期间。利用这一特点,共享单车运营公司可以选择在周中工作日与周末交界的时间,对于不同的土地类型采取适当的调度、维护措施,以提升用户的满意度。

3.2 不同时段源汇点分布特征

对于共享单车而言,其使用频率在一天内的不同时段中通常也是呈现比较明显的分异特征,由图6可知,一天内共享单车使用量最多的时刻是在早晚高峰时段。因此,本文分别对工作日和周末的早高峰(6:30-9:30)和晚高峰(16:30-19:30)时期进行了强源汇点时空分布情况的分析,以此为共享单车的及时调度给出更合理的建议。

3.2.1 早高峰时段源汇点分布特征

图7、8展示了不同类型土地利用斑块中早高峰期间强源点、强汇点数量比例以及净流入、净流出比例。结果表明:在早高峰时段,商业金融用地内强源点数量的比例明显低于强汇点数量比,并且实际的净流入量比也要远大于净流出量比。这说明早高峰期间,商业金融用地内的共享单车数量呈明显增加的态势,且有车辆流入的地区面积较大;与此相反,在居住用地内,周末与工作日的

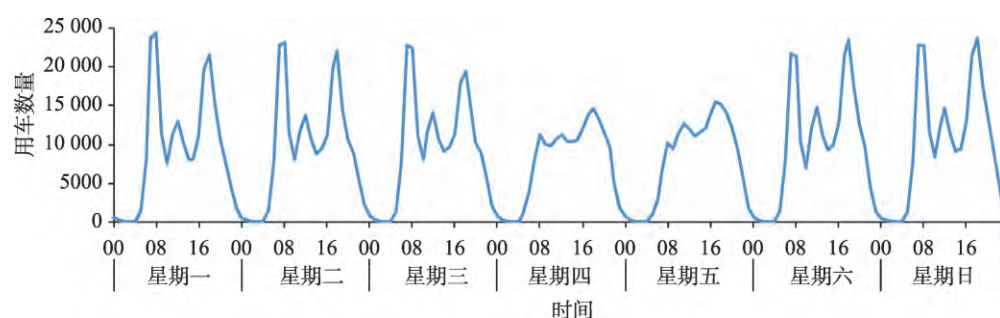


图6 摩拜共享单车一周使用量时序变化

Fig. 6 The regulation of usage of Mobike

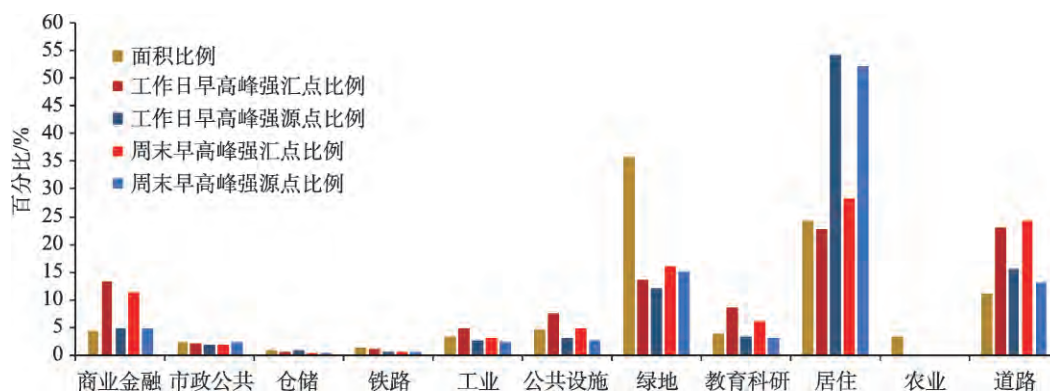


图7 不同土地利用中早高峰期间强源点、强汇点数量比例

Fig. 7 The ratio of intensive sink and intensive source points in different land use during morning peaks

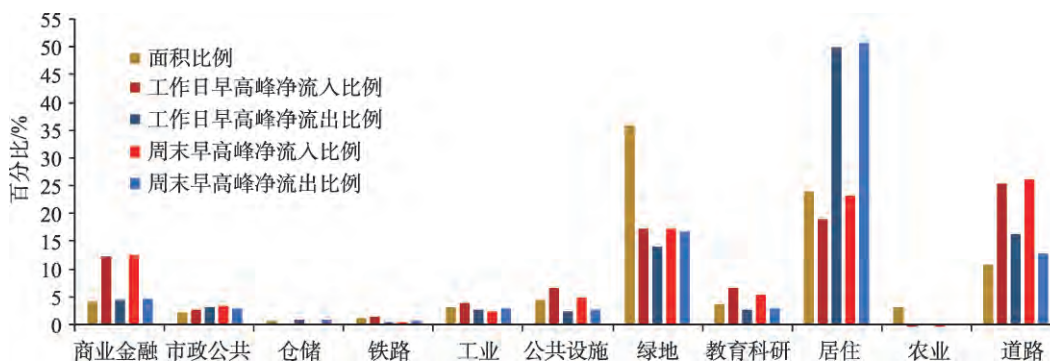


图8 不同土地利用中早高峰期间净流入、净流出比例

Fig. 8 The ratio of ratio of net inflow and net outflow in different land use during morning peaks

强源点数的比例要高于强汇点数比例,并且实际的净流入量比也小于净流出量比,说明早上大面积的居住用地内的车辆在明显减少。而这两个变化基本符合人们平时出行的基本规律:人们以家为起点出发去上班、购物或娱乐。

另外,图7显示在早高峰期间,工作日和周末道路用地的强汇点比例一直要远高于强源点比例,且相对于工作日,周末强源汇点的差距进一步拉大。这表明人们在早上使用共享单车主要是为了满足短距离出行目的,共享单车呈现出从建筑群内向交通便利的地方聚集的特征。

此外,由图8可发现,周末工业用地和教育科研用地的共享单车总净流入比例相较于工作日有所下降,居住用地的净流入比例却有所上升。这一现象说明周末人们的出行习惯与目的产生了变化,早高峰期间的主要目的地不再为办公区。对比表3中周末与工作日的发现,部分土地利用的强源、强汇点平均流出、流入量的趋势也发生了变化:工作日时铁路用地呈现了“集中流入,分散流出”的

现象,并且平均净流入值为各类土地中最高,而周末时,“集中流出”的现象有所减弱,说明火车站在工作日和周末早高峰期间的使用情况不同。

3.2.2 晚高峰时段源汇点分布特征

图9、10展示了不同土地利用中晚高峰期间强源点、强汇点数量比例以及净流入、净流出比例的特征。对比上述工作日与周末时的数据可发现,晚高峰呈与早高峰相反的模式:在商业金融用地与居住用地内,强源汇点比例及净流入流出比例的分布呈现了明显的倒置,商业金融用地的车辆大量流出,居住用地则有单车大量流入。此外,其余一些土地类型也呈现出了源汇属性相反的趋势,如道路用地、教育科研用地和工业用地等。结合早高峰的规律可发现,人们在早晚高峰期间使用共享单车出行的目的明显不同,并体现出明显的潮汐规律。

结合图9、10可发现,不同土地利用类型在工作日与周末的晚高峰期间强源汇点分布存在差异。与工作日相比,教育科研用地、工业用地和公共设

表3 不同类型用地中早高峰强源点的平均净流出量及强汇点的平均净流入量

Tab. 3 The average net inflow of intensive sink and average net outflow of intensive source points in different land use during morning peaks

土地利用类型	工作日早高峰强汇点 平均净流入车辆	工作日早高峰强源点 平均净流出车辆	周末早高峰强汇点 平均净流入车辆	周末强源点 平均净流出车辆
商业金融用地	34.62	23.85	6.88	4.50
市政公共用地	54.55	47.75	11.21	5.86
仓储用地	25.54	39.84	4.36	8.56
铁路用地	51.79	22.73	6.56	5.50
工业用地	30.48	29.75	5.13	6.19
公共设施用地	33.23	23.02	6.46	4.83
绿地	47.98	30.07	6.72	5.43
教育科研设计用地	29.24	21.46	5.49	4.27
居住用地	30.97	23.52	5.13	4.72
农业用地	19.00	0.00	4.33	4.40
道路用地	41.00	27.23	6.75	4.77

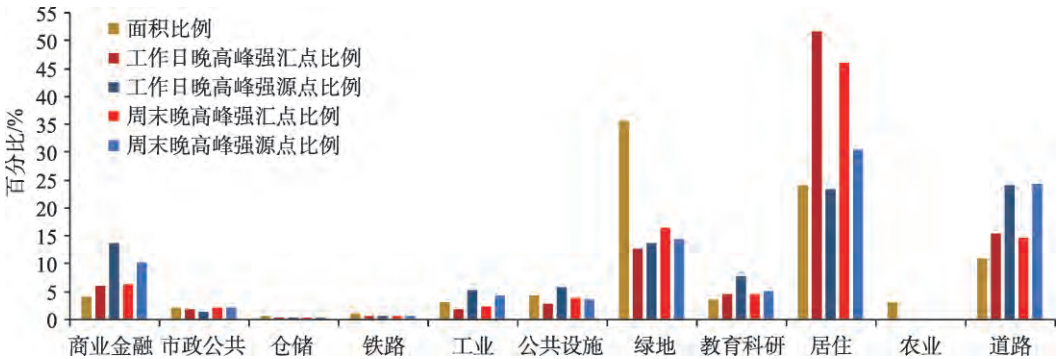


图9 不同土地利用中晚高峰期间强源点、强汇点数量比例

Fig. 9 The ratio of intensive sink and intensive source points in different land use during evening peaks

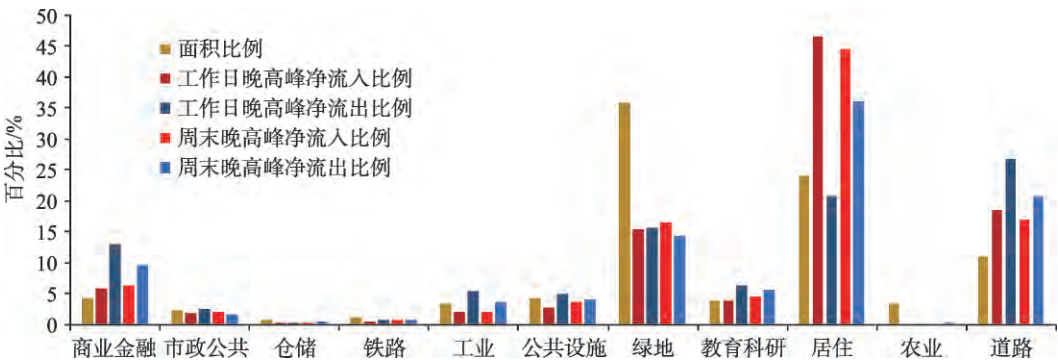


图10 不同土地利用中晚高峰期间净流入、净流出比例

Fig. 10 The ratio of net inflow and net outflow in different land use during evening peaks

施用地在周末时源点比例及净流出比例有了大幅下降。这可能是因为周末的晚间时段,很少人会停留在办公区,对共享单车需求不明显。同时,居住用地的强汇点比例及净流入比例与工作日相比

有了明显的下降,而强源点比例及净流出比例则有较大的升高。这证明与工作日的紧张不同,周末的晚高峰时期人们会有更多的出行需求,回家的时间也会相对推迟。

表4 不同土地利用中晚高峰强源点的平均净流出量及强汇点的平均净流入量

Tab. 4 The average net inflow of intensive sink and average net outflow of intensive source points in different land use during evening peaks

土地利用类型	工作日晚高峰平均 每个强汇点净流入车辆	工作日晚高峰平均 每个强源点净流出车辆	周末晚高峰平均 每个强汇点净流入车辆	周末晚高峰平均 每个强源点净流出车辆
商业金融用地	21.33	26.61	4.86	5.70
市政公共用地	21.98	45.59	4.50	6.90
仓储用地	15.38	19.67	3.91	5.79
铁路用地	17.86	26.05	4.21	4.43
工业用地	23.59	28.15	4.42	6.63
公共设施用地	21.10	23.33	4.67	4.72
绿地	25.68	31.71	4.95	5.53
教育科研设计用地	18.50	23.02	5.03	4.96
居住用地	19.24	25.15	4.75	4.58
农业用地	17.00	0.00	4.20	4.14
道路用地	25.86	31.24	5.71	6.38

另外,由表4可看出,市政公共用地上单车强源汇点所代表的平均流入、流出值一直呈现了“出”大于“入”的现象,并且平均流出量也为各类土地中的最高。这说明无论周末或工作日,在晚高峰时期,共享单车在该地的强源汇点中皆属于集中流出分散流入的情况。

综合上述分析,共享单车的使用在工作日与周末存在早、晚高峰期差异特征。工作日早晚高峰期间,共享单车的功能集中表现为通勤工具,早上呈强源点密集和高净流出量的地区主要分布在居住用地,晚上则主要分布在商业金融用地、工业用地和教育科研设计等具有办公、教育性质的地区;与之相反,早上的强汇点密集和高净流入量的地区为主要分布在办公性质用地,晚上主要分布在居住用地。周末期间,该模式有所变化,办公性质用地的“早入晚出”模式则会明显减弱,居住用地在早高峰的“高源点比、高流出比”的属性基本不变,但是晚高峰期间的汇点比例以及净流入比例则会有所下降。此外,市政公共用地和铁路用地的车辆在不同时间均具有较高的平均净流出量或净流入量,因此共享单车公司在车辆调度时需注意及时清除/补充车辆。

4 共享单车的空间调度

4.1 基于源汇量的空间调度方法

共享单车的使用使其在空间上发生了转移,导致车辆在不同空间位置上供需不平衡,需要通过车

辆调度来解决这一问题。因此,在当前强源、强汇点空间分布的基础上,本文根据空间源汇量及空间邻近关系设计了一种新的算法对单车进行空间调度。调度的原则是优先针对流出量最大的空间单元进行调度,调度车辆来源于该源点(网格)给定邻域范围内汇入量超过某一阈值 δ 的汇点,并依次选择汇入量最大的网格进行调度,直至源点达到平衡(净流入或流出量为0)为止。为了在合适的尺度和空间单元上进行调度,在设计调度算法前,本文将原始单车位置网格数据重采样为了 8×6 的近似正方形网格($920 \text{ m} \times 930 \text{ m}$,原始数据网格大小约 $115 \text{ m} \times 155 \text{ m}$),研究区共形成 43×51 个网格。重采样后网格的源汇值等于网格包含原始源汇值的加和(源为负值,汇为正值)。

定义1:可调度空间单元 流入或流出量大于给定阈值的空间单元称为可调度空间单元;进一步,对于一个表现为源点的空间单元,如果其流出量大于给定的阈值,则称该空间单元为可调度源空间单元;同样,对于一个表现为汇点的空间单元,如果其流入量大于给定的阈值,则称该空间单元为可调度汇空间单元;通常情况下为可调度源空间单元和可调度汇空间单元设定相同的阈值。

定义2:不平衡量 定义全局净流入和净流出绝对值的加和为衡量流入流出不平衡量的指标:

$$F_{inhom} = \sum |F_{in}^{net}| + \sum |F_{out}^{net}| \quad (3)$$

式中: F_{in}^{net} 表示单个汇空间单元上净流入量; F_{out}^{net} 表示单个源空间单元上的净流出量。利用该指

标可以对调度前后的单车分布不平衡性进行对比,以衡量调度效果。

基于上述定义,设计了一种基于可调度源空间单元的调度算法,算法原理如下:

(1) 设定空间单元(重采样后的近似正方形网格)上的调度阈值 δ , 调度邻域范围设定为 3×3 到 11×11 空间单元, 初始值为 3×3 空间单元。

(2) 从研究区所有空间单元找出可调度源空间

单元中流出量最大的空间单元及其邻域; 对邻域内汇空间单元按汇入量进行逆序排列, 依次按流入量从大到小的顺序从邻域内汇空间单元向中心单元调度车辆, 并记录调度过程, 直到中心单元达到平衡(净流入或流出量为0)或者邻域内不存在可调度汇空间单元为止(阈值为0, 邻域 3×3 空间单元条件下, 针对一个可调度源空间单元的一次调度过程如图11所示)。

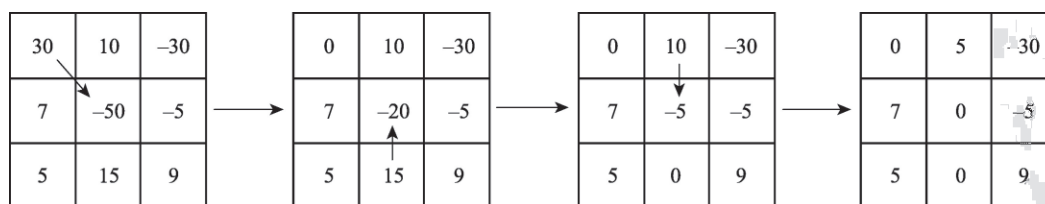


图11 3×3 邻域、阈值为0条件下单个源点调度示意图

Fig. 11 Single source scheduling with 3×3 neighborhood and threshold 0

(3) 对调度后的全局空间单元多次进行步骤(2)操作, 直到在此邻域范围和阈值条件下, 所有可调度源空间单元邻域内不存在可调度汇空间单元为止。

(4) 扩大邻域范围, 进行步骤(2)、(3)操作, 直到完成所有设定邻域范围内的调度为止。

考虑到重采样网格的位置会对采样后的网格值及空间分布产生影响(如图12中红色与蓝色网格代表2种不同的采样情况), 在所有可能的采样方式(共有 $8 \times 6 = 48$ 种)下计算调度策略。针对每种重采样方案, 分别根据上述调度算法计算调度结果, 并计算不同重采样条件下调度结果的不平衡量, 选

取不平衡量最小的重采样方案, 在该采样方案下的调度即为最优调度。

4.2 空间调度结果

图13(a)所示为针对研究数据的最佳采样方案, 其中黑色网格表示原始数据右下角部分, 红色矩形为一个重采样空间单元。在这一采样方案下, 不同调度空间邻域阈值下(图13(b)横坐标表示调度邻域的最大范围, 如 7×7 邻域表示在 3×3 到 7×7 邻域上进行调度), 调度后的不平衡量变化值如图13(b)所示。从图中可看出, 随着调度邻域阈值的增加, 调度后不平衡量越低, 即调度效果越好。但同时, 在实际操作中也会增加调度的复杂性和成本。

以工作日5d数据为例, 假设5天用户自由骑行之后, 根据这5天的空间单元流入流出状况, 利用调度算法进行单车调度, 从而降低单车在空间上的不平衡性。图14(a)为根据用户5d的工作日骑行记录得到单车净流入和净流出的空间分布图。图中最大净流入量为1984辆, 最大净流出量为1889辆, $F_{in\ hom}$ 值为183 223, 空间上的不平衡性十分显著, 特别是在研究区西部、东部, 有大量单车需要被调度。

根据图13(a)中的最佳重采样位置, 在图14(a)所示空间分布的基础上, 设定调度的阈值为0(流入和流出量大于0的空间单元均参与调度), 空间调度的邻域最大范围为 11×11 , 经过1070次调度后的单车净流入流出量空间分布如图14(b)所示。部分调度过程如表5所示。

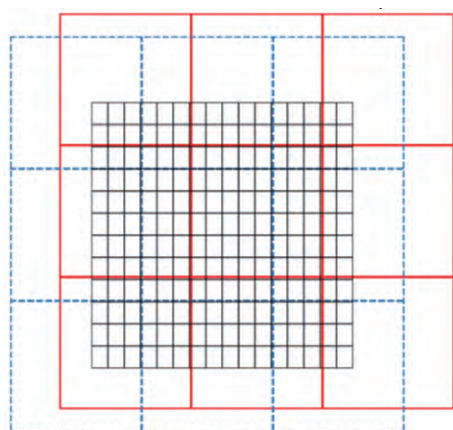


图12 不同重采样方式对网格值的影响

Fig. 12 The effect of different resampling methods on the grid value

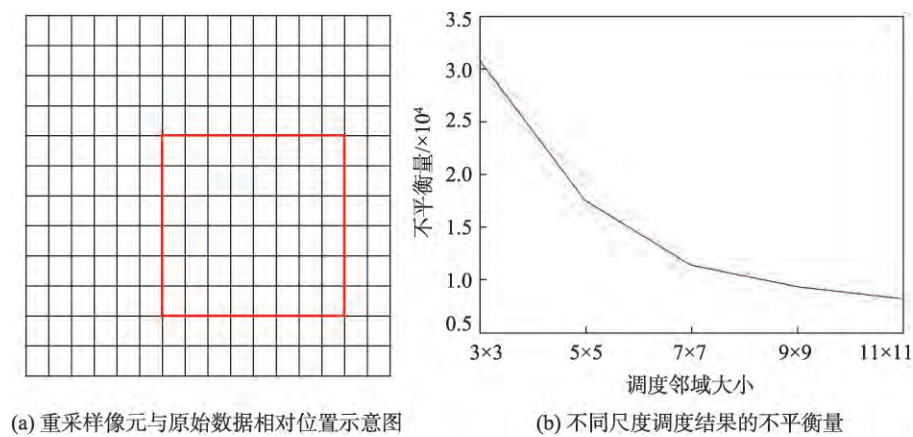


图 13 最佳调度算法的重采样方案

Fig. 13 Resampling scheme of optimal scheduling algorithm

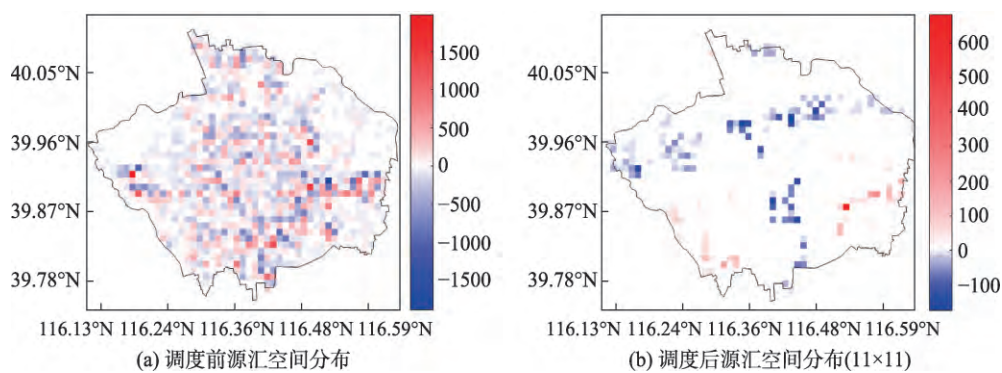


图 14 调度前后源汇空间分布(正值表示净流入,负值表示净流出)

Fig. 14 The distribution of source and sink before and after scheduling (positive value indicates net inflow, negative value indicates net outflow)

表 5 车辆空间调度过程

Tab. 5 Some scheduling process of sharing bikes

调出网格行、列号	调入网格行、列号	调度量
26, 41	25, 40	640
26, 39	25, 40	519
25, 41	25, 40	69
24, 8	23, 9	1027
25, 45	24, 46	943
34, 31	33, 32	686
32, 32	33, 32	180
27, 34	28, 35	567
29, 34	28, 35	282
27, 40	26, 40	590
...

整个调度过程中,共有 87 539 辆单车被调度。调度后空间单元(网格)最大净流入量为 682,最大净流出量为 174, F_{inhom} 值为 8415(调度之前最大净流入量为 1984,最大净流出量为 1889, F_{inhom} 值为

183 223)。这表明通过本文提出的模型进行调度能显著减小摩拜单车在空间上的不平衡性。但是,调度并未能达到空间上的完全平衡(图 14(b)),这是由于单车在大范围上的使用不平衡造成的,在图 14(b)上表现为蓝色和红色区域相距较远。在不考虑调度成本的前提下,解决这一问题的关键在于扩大在实验中的调度邻域范围。本文中,将最大空间邻域设置为 11×11,即 10.12 km×10.23 km,在这一空间尺度上调度,单车的不平衡性虽然显著减小,但仍无法达到全局的空间供需平衡。进一步扩大空间邻域范围,调度模型最终可以使单车在空间上达到完全平衡。

4.3 空间调度结果分析

将每个重采样后的网格内所占面积比例最大的那类土地利用作为网格的土地利用类型,由此对每类网格的车辆调入、调出情况进行统计,可得到

表6(表格中括号外的数据为发生调度的个数,每个括号内的数据为发生调度的单车数量)所示的结果。结果表明:调度发生的区域主要集中在商业金融用地、公共设施用地、绿地以及居住用地等。而在所有被调度的网格和共享单车中,位于对角线上的元素,即在同类土地利用类型中产生调度的网格和单车所占的比例分别为46.07%和47.11%,这代表近一半的调度发生在邻近的、且具有相同土地利用类型的区域之间。在此调度过程中,居住用地内的调度数量占比最大,其网格类内调度比及车辆类内调度比分别为46.45%和72.87%。因此,建议单车管理者在进行车辆调度时,需将注意力主要集中在居住用地内部的单车上。

表7对每类土地利用的单车净调入量和净调出量(即调出至其它种类土地或由其他种类土地调入车辆的数目)进行了统计。可以发现,各土地利用类型中车辆的净调入量与净调出量的关系基本与前文中的车辆净流出比与净流入比的关系一致,即调入量高于调出量的地区,其净流出比高于净流入比。这表明调度模型与车辆的流动模式基本相反,一定程度上反映了调度模型的准确性,但具体的调入调出方案与车辆源汇分布有所区别。例如,道路用地的车辆调度主要呈调出模式,但图5显示道路用地上的共享单车具有明显流出的模式,需调入车辆才能满足平衡。这一现象的产生主要是由网格的重采样引起的,由于道路主要呈线状,在重采样

的网格中面积占比难成主导优势,因此重采样后属于道路的网格较少,与实际情况有一定偏差,在使用该模型时需注意这一情况。

本文模型部分只考虑了网格尺度的车辆调度。而实际上,重采样后的网格并非均质,车辆调入网格后不能在网格内部均匀分配,因此需要结合源汇的时空分布及其与土地利用类型之间的关系,将网格尺度的调度结果作为背景知识来指导网格内部的单车分配。例如,在不同时段对不同网格进行调度时,调度人员可在判断周围地物的属性后,将该时段内具有“汇”现象地区的共享单车调入至具有“源”现象的地区。例如,在早高峰时期,可将位于同一网格内的学校、办公区的车辆需调入至周围的住宅区;而在晚高峰时期,可将同一网格内的住宅区的车辆需调至附近的学校、办公区,以满足人们的用车需要,促进供需的平衡。由于篇幅限制,关于网格内部的单车分配问题,本文只提出一种方案,具体不再展开。

5 结论

本文采用共享单车骑行数据并结合土地利用分类数据分析了北京市共享单车在周末与和工作日的强源汇点分布状况。首先,通过共享单车的净流入或净流出率与净流入与净流入量确定了强源点和强汇点,从而分析不同土地利用类型上的时空差异;其次,分析了北京市市区内居民在不同时间的总体骑行特征,并在此基础上提出了共享单车的调度模型以解决车辆使用的不平衡问题。本文具体研究结论如下:

(1)工作日与周末的共享单车使用模式存在显著差异。周末时共享单车使用数量较工作日时有显著下降;此外,二者的频繁用车地区不同,周末时,带有明显工作、教育属性的地区的用车比例显著减少,而居住区与商业区等地的用车比例则有所上升。

(2)早晚高峰期间的共享单车使用呈相反模式。同一土地利用类型的早晚高峰期间的车辆源汇属性有很大可能会发生反转,如在早高峰期间带有办公属性的区域(教育科研用地、工业用地、商业金融用地等)会呈现明显车辆流入的现象,而晚高峰则会有大量单车流出,而居住用地的模式则与其正好相反,早高峰会有单车流出,晚高峰则会有单车流入,这也反映了用户在一天的出行特征。

表7 工作日各类用地中净调入、净调出车辆

Tab. 7 The net called in and net called out of sharing bikes in each land uses during workdays

土地利用类型	净调出量	净调入量
商业金融用地	1983	723
市政公用设施用地	468	375
仓储用地	186	453
铁路用地	785	863
混合用地	958	1034
工业用地	1379	3206
公共设施用地	942	3771
绿地	13 568	11 446
教育科研用地	4054	2970
居住用地	18 950	19 535
体育用地	3	751
水域	58	112
机场用地	0	117
农业用地	477	295
道路用地	2421	670

(3)工作日与周末期间的早晚高峰用车模式也存在较大差异。例如,教育科研用地、工业用地以及商业金融用地等地,在周末时段,车辆在早高峰的净流入比例及强汇点比例与晚高峰的净流出比例及强源点比例都会比工作日明显下降,而居住用地在周末晚高峰时强源点比例增多,强汇点比例减少。

(4)本文所提出的空间调度方法可以有效地减少共享单车积压或不足的现象。通过调度,北京城区的供需不平衡值可由183 223减少至8415,可有效解决共享单车供需不均衡的问题,提高共享单车的利用效率,增加人们出行的便利程度。

(5)共享单车的调度需结合土地利用进行。实验表明近一半的调度发生在临近的、相同类别的土地利用中,而在所有类别的类内调度中,居住区占据优势。此外,由于数据精度有限,道路用地的单车调度需要根据源汇分布进行详细考虑,位于道路上的共享单车需要及时补充或清理。

(6)调度模型只负责在不同空间单元之间进行量化的调度,单个空间单元内部单车的空间分配需要基于先验知识,即根据单车源汇时空特征及源汇与土地利用的关系来实现。

本文通过共享单车的骑行数据对其源汇点时空特征进行了分析。受数据限制,在骑行时长,源汇点数量计算上还存在一定的误差。未来若能获取更完整、精确的数据,结合不同类型的POI进行源汇区域的研究,则可进一步提升分析结果的精度和可靠度。另外,本文中的空间调度模型采用了局部最优模型,未考虑成本因素。今后需要在车辆供需平衡的基础上,开展通过控制成本来改进调度方法的研究。

参考文献(References):

- [1] 共享单车一天骑了七千万人次 创造经济社会影响2213亿. http://www.xinhuanet.com/fortune/2018-02/08/c_1122384126.htm, 2018-02-08. [70 million people rides sharing bicycles a day, creating economic and social impact of 221.3 billion yuan. http://www.xinhuanet.com/fortune/2018-02/08/c_1122384126.htm, 2018-02-08.]
- [2] 刘亚楠. 共享单车发展研究分析[J]. 时代金融, 2017(8): 251-254. [Liu Y N. Research and Analysis on the development of shared bicycle[J]. Times Finance, 2017(8):251-254.]
- [3] Frade I, Ribeiro A. Bicycle sharing systems demand[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2014,111(111): 518-527.
- [4] Robert Cervero, Olga L. Sarmiento, Enrique Jacoby, et al. Influences of built environments on walking and cycling: lessons from Bogotá[J]. International Journal of Sustainable Transportation, 2009,3(4):203-226.
- [5] Reid Ewing, Robert Cervero. Travel and the built environment[J]. Journal of the American Planning Association, 2010,76(3):265-294..
- [6] Kemperman A, Timmerman H. Influences of built environment on walking and cycling by latent segments of aging population[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2010,2134(2134):1-9.
- [7] Moudon A V, Lee C, Cheadle A D, et al. Cycling and the built environment, a US perspective[J]. Transportation Research Part D Transport & Environment, 2005,10(3): 245-261.
- [8] El-Assi W, Mahmoud M S, Habib K N. Effects of built environment and weather on bike sharing demand: A station level analysis of commercial bike sharing in Toronto[J]. Transportation, 2017,44(3):589-613.
- [9] Zhang Y, Thomas T, Brussel M, et al. Exploring the impact of built environment factors on the use of public bikes at bike stations: Case study in Zhongshan, China[J]. Journal of Transport Geography, 2017,58:59-70.
- [10] Liu Z, Jia X, Cheng W. Solving the last mile problem: Ensure the success of public bicycle system in Beijing[J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2012,43(4):73-78.
- [11] 罗桑扎西,甄峰,尹秋怡.城市公共自行车使用与建成环境的关系研究——以南京市桥北片区为例[J].地理科学,2018,38(3):332-341. [Luo S Z X, Zhen F, Yin Q Y. How built environment influence public bicycle usage: Evidence from the bicycle Sharing system in Qiaobei Area, Nanjing[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018,38(3): 332-341.]
- [12] 王海星,王德占,申金升.蚁群算法解决有时间窗的车辆优化调度问题研究[J].物流技术,2006(11):37-40. [Wang H X, Wang D Z, Shen J S. Ant colony algorithm for VRP with time windows[J]. Logistics Technology, 2006(11): 37-40.]
- [13] 柳祖鹏,李克平,朱晓宏.基于蚁群算法的公共自行车站间调度优化[J].交通信息与安全,2012,30(4):71-74. [Liu Z P, Li K P, Zhu X H. Optimal dispatch between stations for public bicycle based on ant colony algorithm[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2012,30(4):71-74.]
- [14] 丁秋雷,胡祥培,李永先.求解有时间窗的车辆路径问题的混合蚁群算法[J].系统工程理论与实践,2007,27(10): 98-104. [Ding Q L, Hu X P, Li Y X. A hybrid ant colony

- system for vehicle routing problem with time windows [J]. System Engineering Theory and Practice, 2007,27 (10):98-104.]
- [15] 李军.车辆调度问题的分派启发式算法[J].系统工程理论与实践,1999,19(1):27-33. [Li J. Generalized assignment heuristics for vehicle scheduling[J]. System Engineering Theory and Practice, 1999,19(1):27-33.]
- [16] 葛显龙,王旭,代应.基于改进遗传算法的有时间窗车辆调度问题研究[J].计算机应用研究,2011,28(2):445-447. [Ge X L, Wang X, Dai Y. Analysis on vehicle scheduling problem with time window based on improved genetic algorithm[J]. Application Research of Computers, 2011,28 (2):445-447.]
- [17] 张建国,吴婷,蒋阳升,等.基于蚁群算法的公共自行车系统调度算法研究[J].西华大学学报:自然科学版,2014,33 (3):70-76. [Zhang J G, Wu T, Jiang Y S, et al. Study on scheduling algorithm for public bicycle system based on ant colony algorithm[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2014,33(3):70-76.]
- [18] Rudloff C, Lackner B. Modeling demand for bikesharing systems: Neighboring stations as source for demand and reason for structural breaks[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2014,2430:1-11.
- [19] 北京历史天气. http://tianqi.2345.com/wea_history/54511.htm, 2018-06-14. [Beijing's historical weather. http://tianqi.2345.com/wea_history/54511.htm, 2018-06-14.]
- [20] 黄萌,陶迎春,刘光,等.北京市道路名称分类与方向统计分析[J].北京测绘,2017(2):118-120. [Huang M, Tao Y C, Liu G, et al. Analysis of Beijing's Road Names and Road Orientation Distributions[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2017(2):118-120.]
- [21] 庄楚天,吴戈.基于站点爬虫数据的公共自行车系统时空特征分析[J].交通信息与安全,2017,35(3):51-58. [Zhuang C T, Wu G. Spatial-temporal characteristics of a shared bicycle system based on web crawler data[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2017,35(3):51-58.]
- [22] Guo D, Zhu X, Jin H, et al. Discovering spatial patterns in origin- destination mobility data[J]. Transactions in Gis, 2012,16(3):411-429.