

彭建东, 张远航, 申犁帆, 等. 职住地建成环境对轨道交通通勤行为的非线性影响机制研究——以武汉市为例 [J]. 地理科学, 2024, 44(9): 1534-1543. [Peng Jiandong, Zhang Yuanhang, Shen Lifan et al. Non-linear influencing of built environment of residence and workplace on rail transit commuting behavior: Taking Wuhan City as an example. Scientia Geographica Sinica, 2024, 44(9): 1534-1543.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.20221579

职住地建成环境对轨道交通通勤行为的 非线性影响机制研究 ——以武汉市为例

彭建东¹, 张远航¹, 申犁帆², 代琦³, 杨红⁴

(1. 武汉大学城市设计学院, 湖北 武汉 430072; 2. 北京邮电大学经济管理学院, 北京 100876; 3. 武汉市规划研究院, 湖北 武汉 430014; 4. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 改革开放以来中国大城市快速蔓延导致了职住分离及交通拥堵等问题, 倡导轨道交通等绿色交通方式出行成为大城市缓解通勤压力的重要手段。当前研究主要以居住地作为地理背景考察建成环境对轨道交通通勤的作用, 但较少探索就业地建成环境的影响。本研究以武汉市为例, 通过 189 个轨道站点的刷卡数据识别轨道交通通勤人员并构建通勤出行链, 通过梯度提升决策树 (GBDT) 解析职住地涉及建成环境和轨道站点的 30 个特征因素对通勤客流量和通勤时间的非线性影响机制。研究发现: ① 居住地通勤客流量表现为较集中的点状分布, 就业地通勤客流量则呈现显著的“中心-外围”结构, 职住地两端通勤时间的空间格局均呈中间低、外围高的分布特征; ② 职住地周边建成环境因素对轨道交通通勤客流量和通勤时间普遍存在非线性影响及阈值效应, 整体而言居住地建成环境的相对影响程度高于就业地, 但就业地“公司企业数”是影响通勤客流最重要的要素, 就业地“与城市中心距离”则是影响通勤时间的首要因素; ③ 职住地周边同一建成环境因素, 对于通勤客流量和通勤时间的影响可能截然相反, 这与城市轨道交通网络建设和社会实际发展状况相关。研究结果可以更好地理解职住地建成环境与轨道交通通勤行为的关联, 有助于促进城市轨道交通和城市职住空间的协调发展。

关键词: 职住关系; 建成环境; 城市轨道交通; 通勤行为; 梯度提升决策树; 武汉市

中图分类号: TU984.113 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2024)09-1534-10

改革开放以来, 中国城镇化的快速发展引起了城市空间的不断重构, 社会组织和经济活动在空间上的重组重塑了人们的日常活动和出行方式^[1]。为了降低生活成本, 部分居民选择居住在房价更低、区位更偏、通勤时间更长的地区, “职”与“住”在空间上逐渐分离^[2], 居民通勤时间的长短已逐渐成为制约城市高质量发展和提升居民幸福感的重要因素^[3]。而轨道交通作为连接居住和就业功能的重要纽带, 被认为是在既有职住空间格局基础上提升就业可达性的重要手段^[4]。因此, 研究居民轨道交通通勤行为特征及其影响机制, 对缓解长距离通勤导致

的职住空间失衡问题具有重要意义^[5]。

轨道交通的开发和建设主要通过改变交通可达性和职住选择对建成环境和居民通勤行为产生显著影响。首先, 轨道交通的开发和建设提高了沿线地区的交通可达性, 使其周边土地发生显著变化, 促进了高密度住宅区和商业区的形成, 直接影响了居民职住选择^[6]。其次, 建成环境的变化使居民更倾向于乘坐公共交通, 减少汽车的使用^[7]。尽管地铁通勤时间仅限于站点之间的交通时间, 但地铁的开发和建设通过影响居民的职住选择, 进一步影响了地铁通勤时间。根据时间出行预算理论以及北京和深

收稿日期: 2023-01-29; **修订日期:** 2023-07-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(52108056)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (52108056).]

作者简介: 彭建东(1968—), 男, 江苏扬州人, 教授, 博导, 主要研究方向为城市与区域规划研究、历史遗产保护、城市交通与土地利用。

E-mail: 99339101@qq.com

通信作者: 杨红。E-mail: hyangup@whu.edu.cn

圳的实证研究发现,人们每天在交通出行上的时间存在一定忍受阈值,并且会综合权衡通勤时间和生活成本来决定是否迁居或更换工作^[8-10]。因此,轨道交通的开发和建设通过改变建成环境和居民的通勤方式,扩大了居民职住空间,进而影响其通勤行为,尤其是通勤时间。

现有研究多以居住地作为地理背景考察建成环境对轨道交通通勤的影响,忽略了就业地建成环境的作用^[6]。然而,已有研究证实就业地公交车站密度和就业密度对家庭汽车拥有量的影响最大^[11],就业地的道路密度与过境通勤距离呈负相关^[12]。同时,地铁站点的出入口数量、中介中心性等指标也会影响通勤行为^[13-17]。因此,全面考虑职住两地对轨道交通通勤行为的影响具有重要现实意义。此外,已有理论和实证研究在分析二者关系时,大多假定的是线性或广义线性关系^[5, 18-19],主要采用的是最小二乘法(OLS)和地理加权回归(GWR)模型等^[20-22],但这忽略了其复杂的非线性传导机制,即建成环境因素对于通勤行为仅在特定的取值范围内才会产生显著影响^[23-25]。因此,通过机器学习的方法研究职住地建成环境对城市轨道交通通勤行为的非线性影响机制更具有规划实践价值和指导意义。

综上所述,尽管国内外学者对城市居民轨道交通通勤行为及其影响因素进行了深入研究,取得了丰硕成果,但主要集中在居住地方面,对就业地建成环境的研究仍显不足。此外,中国大城市的非线性影响机制尚需进一步实证研究。因此,本研究以武汉市为例,通过地铁刷卡数据识别通勤人员,结合站点周边建成环境和常住人口普查等多源数据,运用梯度提升决策树(GBDT)模型,解析职住地站点设计、站域建成环境等 30 个因素对通勤客流量和通勤时间的非线性影响机制。本研究旨在微观尺度上为轨道站点周边土地利用优化提供指导,缓解大城市职住分离引发的交通拥堵问题。

1 研究区、数据来源与研究方法

1.1 研究范围概况

本文以武汉市都市发展区为研究范围,该范围的总用地面积为 3 261 km²。受地理环境影响,武汉

长期以来保持着“两江三镇”的地理格局,城市呈“三镇鼎立”的组团式发展。面对逐渐凸显的城市职住空间分离的问题,轨道交通为缓解城市通勤压力起到了重要的作用^[26]。截至 2019 年 3 月,武汉市地铁运营线路长度为 298 km,已开通运营 9 条线路共计 189 个车站(不含换乘站)。在已有研究中,轨道交通站点周边范围的选取多依据 TOD 原则,大致可以划分为 400 m、600 m、800 m 和 1 000 m 共 4 个档次^[25, 27-28],其中,800 m 是最常用的范围,约是一般成年人 10 min 的步行距离。此外,考虑到武汉市 2021 年颁布的《武汉市开展高标准城市建设工作方案》(https://www.wuhan.gov.cn/zwgk/xxgk/zf/wj/bgtwj/202107/t20210702_1731391.shtml)中提出:“至 2025 年,武汉市地铁站点 800 m 覆盖都市发展区人口达到 47.6%、覆盖岗位达到 44.8%。”因此,本研究将 800 m 作为地铁站点周边影响范围半径,如图 1 所示。

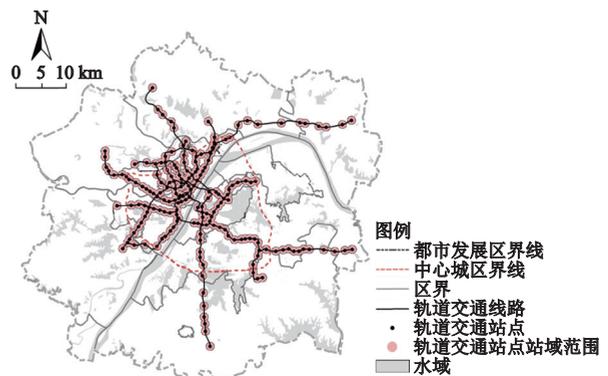


图 1 武汉市都市发展区

Fig.1 Wuhan metropolitan development area

1.2 数据来源及变量设置

本研究的数据主要包括:2019 年 3 月 11—15 日连续 5 个工作日的武汉市轨道交通刷卡数据;2019 年武汉市轨道交通站点数据;2015 年武汉市土地利用现状数据^①(官方矢量数据可保证研究的准确性,由于轨道交通建设对城市用地分类存在有滞后,故对研究的影响忽略不计);2018 年武汉市社区级常住人口数据^②;2019 年武汉市路网数据^③;2019 年武汉市兴趣点数据(POI)^④。

① 地铁刷卡数据、站点数据和土地利用现状数据都为武汉规划研究院内部数据,实地调研获取 [2022-04-29]

② 武汉规划研究院内部数据,实地调研获取 [2019-03-20]

③ <https://www.openstreetmap.org/> [2020-03-25]

④ <https://lbsyun.baidu.com/> [2020-03-25]

参考已有研究^[29-33], 基于职住两地建成环境对居民通勤行为的影响(图 2), 并结合武汉市地铁站站域的组织结构, 本研究选取了职住两地建成环境 5D 要素和地铁站点特征等 30 个自变量纳入指标体系。因变量选择了轨道交通站点客流量及出行时间, 这是居民轨道交通出行的重要表征^[34]。最终构建指标体系如表 1 所示。此外, 不同于一般的出行, 本文构建的通勤链是通勤人员从居住地出发到就业地, 再返回到居住地的规律性过程, 从每个工作日来看其所有出行地点的两端是首尾连接的。参照已有研究^[9, 35], 本文将工作日中有不少于 3 次规律性通勤特征的 ID 识别为通勤人员, 最终识别出武汉市地铁工作日日均刷卡人数为 1 551 493 人, 其中通勤人数为 166 141 人, 占持卡人数的 10.71%, 并以 189 个地铁站点为基础构建起由居住地到就业地的通勤链共 21 203 条。

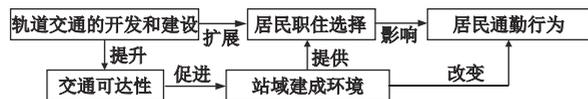


图 2 职住两地建成环境对通勤行为的影响

Fig.2 Impact of the built environment in residence and workplace on commuting behavior

1.3 研究方法

本文采用梯度提升决策树(GBDT)模型解析职住地建成环境与通勤客流和通勤时间的非线性关系。不同于基于线性关系的假设, GBDT 模型是利用损失函数的负梯度作为前一轮学习器的残差近似值, 在残差减小的梯度方向建立新的决策树, 使模型加速收敛到局部或全局最优解^[36]。此外, GBDT 不仅可以解决多重共线性问题^[37], 还可以控制模型中其他预测变量后生成偏依赖图, 以解释预测变量和响应变量之间的关系^[38]。其模型可表示为^[39-41]:

$$F(x) = \sum_{m=1}^M f_m(x) = \sum_{m=1}^M \beta_m h(x; a_m) \quad (1)$$

式中, x 是一组解释变量集合(即本研究中职住地站域建成环境和站点特征), $F(x)$ 是响应变量 y (即通勤特征) 的近似函数, 是一系列决策树输出的累加结果。此外, M 是决策树的总数, m 是用于表示当前决策树编号(从 1 到 M) 的索引变量, a_m 代表每一棵决策树 $h(x; a_m)$ 的分割位置的平均值和终端节点参数, 用于反映决策树的结构, β_m 是代表第 m 棵树的权重, 通过最小化指定损失函数估计而得到^[42]。

$$F_m(x) = F_{m-1}(x) + \phi \times \beta_m h(x; a_m), 0 < \phi \leq 1 \quad (2)$$

表 1 住地站域建成环境和站点特征的变量设置及定义

Table 1 Setting and definition of variables for the built environment and station characteristics in the metro station areas of residence and workplace

变量名称	指标名称	变量定义
站点通勤特征 (2个)	通勤时间	通勤人员刷卡进入、离开轨道站点所花费的时间/min
	通勤客流量	轨道站点由居住地至就业地的日均通勤流量/人次
站域建成环境特征 (11个)	建筑容积率	轨道站点站域影响范围内的建筑容积率
	常住人口数量	站点站域影响范围内的适龄就业常住人口数/人, 通过克里金插值法计算得到
	土地利用混合度	轨道站点站域影响范围内的土地利用混合度/%, 通过熵值法计算得到
	路网密度	轨道站点站域影响范围内的道路长度/m
	道路交叉路口数量	轨道站点站域影响范围内的交叉路口数/个
	公交站点密度	轨道站点站域影响范围内的地面公交站点数/个
	公司企业数量	轨道站点站域影响范围内的公司企业个数/个
	购物中心数量	轨道站点站域影响范围内的购物中心个数/个
站点特征 (4个)	生活服务设施数量	轨道站点站域影响范围内的生活服务设施个数/个
	和城市中心的距离	轨道站点与城市中心的直线距离/m
	和城市次中心的距离	轨道站点与最近城市次中心的直线距离/m
	中介中心性	轨道站点的中介中心性, 利用Pajek软件计算得到
	是否为始发站	轨道站点是否为始发站(是1; 否0)
	是否为换乘站	轨道站点是否为换乘站(是1; 否0)
	出入口数量	轨道站点的出入口数/个

对于每棵树都乘以学习率因子, 以实现损失函数的最小化。本研究中采用一个五重交叉验证程序, 以确定学习率、树的复杂性和树的数量的最佳组合。使用 RStudio 平台中的“gbm”包, 将数据集分成 5 个不同的子集, 每个子集占数据的 20%, 每个子集用作测试数据, 而其余子集用于训练模型。为避免潜在的过拟合问题, 本研究将学习率固定为 0.001, 以生成具有较低预测偏差和合理的树大小(至少 1000 棵树)的最终模型。针对树的复杂性, 其理论上反映的是自变量之间的真实相互作用, 然而, 这些信息始终是未知的。为了获得可靠的模型结果, 本研究通过一系列的模型进行测试, 依次增加相互作用的深度水平的树木从 1 到 10, 最终的模型是基于树的复杂性为 10, 从而确保模型的可靠性和稳定性。

2 结果分析

2.1 职住地通勤客流量及通勤时间特征

图 3 显示了武汉市轨道交通职住地日均通勤客流量。居住地日均通勤客流量呈集中点式分布, 而就业地则呈现中心高、外围低的分布特点。居住层面, 日均通勤客流量排名前 4 的站点为金银潭站、铁机路站、建安街站和杨家湾站, 均在 3400 人次以上, 位于汉口、徐东、汉街、光谷等就业中心附近, 反映了武汉市多中心发展模式^[43]。通勤客流量排名后 20 位的站点主要分布在城市外围区域。就业层面, 楚河汉街站以 8016 人次的日均通勤客流量排名第 1, 其他高流量站点也集中在城市就业中心及其附近, 通勤客流量排名后 20 位的站点同样主要分布在城市外围区域。图 4 显示了职住地日

均通勤时间分布, 呈现“中心低、外围高”的特点。通勤人员的平均通勤时间为 27.49 min, 其中 87.57% 的人通勤时间在 45 min 以内, 3.84% 的人通勤时间超过 60 min。中心城区就业地的平均通勤时间普遍在 36 min 以下, 而居住地的平均通勤时间普遍在 28 min 以下。

2.2 职住地建成环境对轨道交通通勤客流量的非线性影响

依据职住地两端建成环境对轨道交通通勤客流量的相对重要性的结果, 居住层面总贡献度为 61.79%, 就业层面为 38.21%, 总体来看, 居住层面建成环境对通勤客流量的影响更大。排名前 6 的自变量分别是就业地公司企业数量、居住地道路交叉口数量、居住地土地利用混合度、居住地与城市次中心距离、就业地与城市中心距离以及居住地购物中心数量。其中, 就业地公司企业数量对客流的影响程度最高, 贡献度为 13.51%, 这与已有的研究结果是一致的^[11, 35]。职住两地是否为始终站或换乘站等指标对通勤客流量的影响十分小, 这可能是因为通勤是更为强制性的出行行为, 相比于一般出行, 不会考虑换乘是否便利以及站点在网络中的连接度等因素^[32]。就业地与城市中心距离排名第 5, 而与城市次中心距离排名第 26, 这表明武汉虽然是多中心的发展结构, 但城市次中心尚未承担起分担城市职能、缓解就业压力的作用, 人们更倾向于向城市中心集聚^[21, 44]。就业地公交车站数的贡献度较低, 这与南京和上海的研究结果并不一致^[45-46], 这可能是武汉的就业中心区域均已实现地铁的全覆盖, 因而对公交接驳的需求较小。

此外, GBDT 模型结果显示, 几乎所有的自变

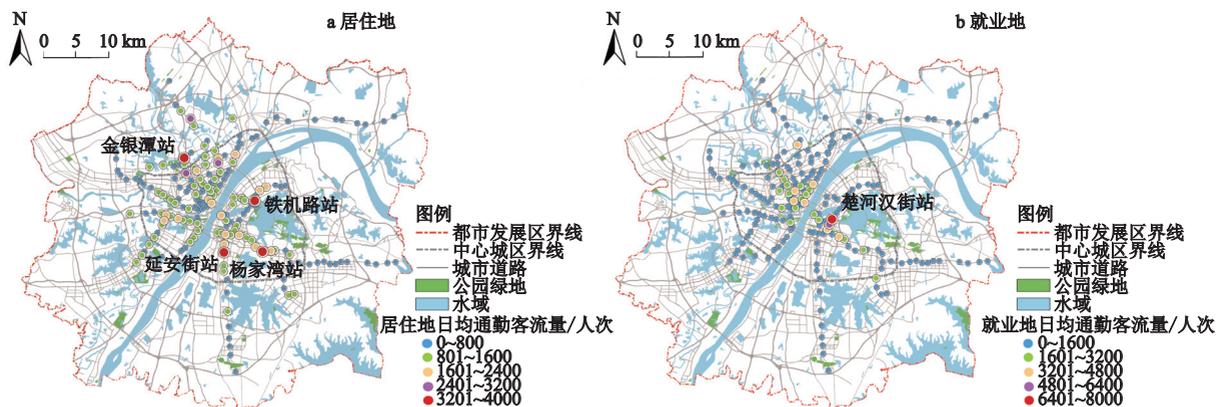


图 3 武汉市职住地日均通勤客流量

Fig.3 Average daily commuter ridership in residence and workplace in Wuhan City

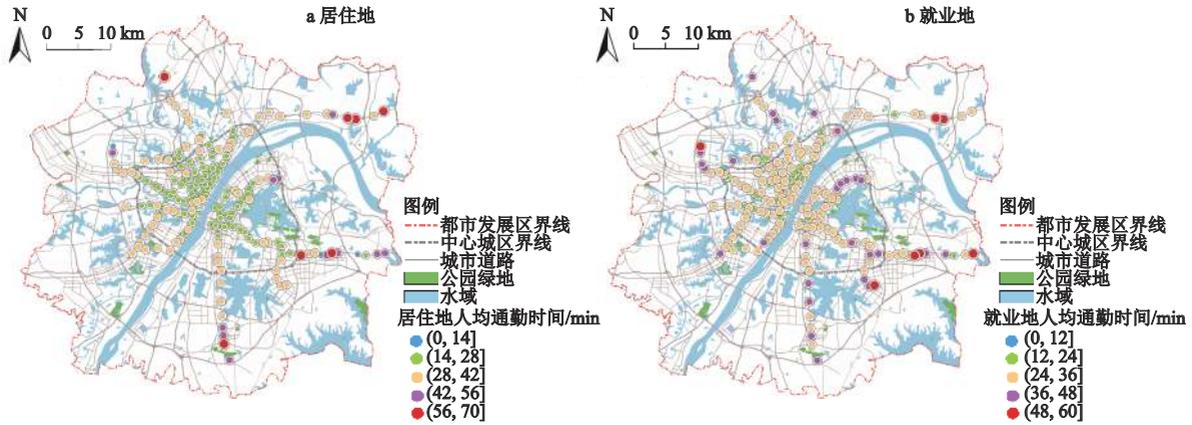


图 4 武汉市职住地人均通勤时间

Fig.4 Average daily commuter time in residence and workplace of Wuhan City

量均与通勤客流量之间均存在有明显的非线性效应,依据排名选取最重要的 6 种自变量的偏依赖图(图 5)进行分析。就业地公司企业数对通勤客流量的影响最为显著,当其处于 80~300 个时对地铁客流具有正向影响,这与武汉的研究一致^[35],因为就业提高了通勤需求,有利于居民乘坐地铁通勤。居住地道路交叉口数量反映了红绿灯数量的多少和步行至地铁的时间长短,与上海的研究一致^[46],当其处于 8~36 个时对地铁客流具有负向影响。居住地土地利用混合度在 0.3~0.8 之间时、居住地与城市

次中心距离及就业地与城市中心距离在 0~18 km 时对地铁客流具有负向影响,居住地购物中心数量在 0~20 个对地铁客流具有正向影响,这也与既有研究结果一致^[23, 25, 47-48],即当居住地站域内就业岗位越少、离城市次中心越近、购物中心越多以及就业地离城市中心越近,就越有利于促进居民乘坐地铁出行。

2.3 职住地建成环境对轨道交通通勤时间的非线性影响

依据职住地两端建成环境对轨道交通通勤时

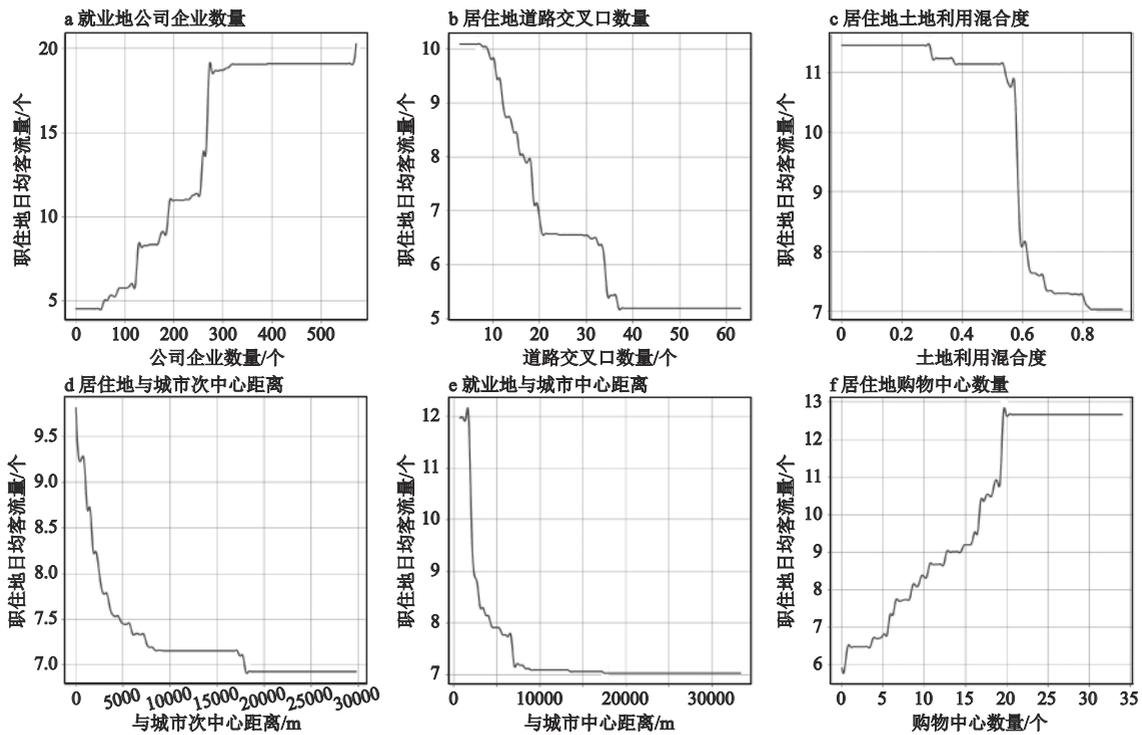


图 5 武汉市职住地建成环境对轨道交通通勤客流量的非线性影响

Fig.5 Nonlinear influence of built environment of residence and workplace on commuter ridership of Wuhan City

间的相对重要性的结果, 居住层面总贡献度为 51.23%, 就业层面为 48.77%。其中, 排名前 2 的是就业地与城市中心距离以及居住地与城市中心距离, 贡献度分别为 12.92% 和 12.51%, 这与韩国首尔的研究是一致的^[49]。排名第 3 的是贡献度为 5.24% 的就业地中介中心性, 与上海等地的研究类似^[46], 这证实了城市地铁网络建设的重要性。同样地, 提取影响通勤时间变化最重要的 6 种因素的偏依赖(图 6)进行分析。

就业地和居住地与城市中心距离分别为 0~28 km 时, 均与通勤时间呈正向影响, 证实了城市中心作为就业核心对通勤时间的显著影响^[49], 即距离越远, 通勤时间越长。就业地中介中心性在 0~0.32 之间时对通勤时间呈正向影响, 证实了地铁网络结构对交通出行的重要性^[10], 这也与武汉市地铁建设时序有关, 更高的中介中心性反映出更优越的地理区位。居住地常住人口数量与通勤时间呈现正向影响, 这与南京的研究结果相似但又有区别^[45], 不同于多元回归分析所发现的线性关系, 本文发现当常住人口在 0~70 000 人时, 通勤时间的增长呈先急后缓的非线性变化。居住地与城市次中心距离为 0~23 km、就业地建筑容积率在 0~2.3 之间时对地铁客流具有正向影响, 这与深圳的研究结果一致^[10], 这是由于

居住地离城市次中心越远、就业地建筑容积率越高, 对就业岗位需求越大, 越能吸引远距离通勤。

3 结论与讨论

3.1 结论

本研究基于武汉市轨道交通刷卡数据、POI 数据、建成环境等多源数据, 将职住地两端建成环境纳入同一指标体系, 从通勤客流量和通勤时间两个方面探讨了武汉市轨道交通的通勤特征, 并运用梯度提升决策树方法, 解析了职住地两端建成环境对通勤客流量和通勤时间的非线性影响机制, 以及各建成环境因素对轨道交通通勤特征影响的相对重要性。主要结论如下:

- 1) 武汉市轨道交通通勤客流量和通勤时间分布存在显著的空间异质性。居住地通勤客流量集中点状分布, 就业地通勤客流量呈现中心高、外围低分布。通勤时间在居住地两端均呈现中间低、外围高的分布。武汉市平均通勤时间为 27.49 min, 45 min 以内的通勤占 87.57%, 超过 60 min 的极端通勤占 3.84%。主要通勤集中在城市中心的主城区, 长时间通勤多为从城市外围向中心的通勤, 这揭示了武汉市职住分离的问题仍然突出。
- 2) 职住地两端的建成环境对通勤客流和通勤

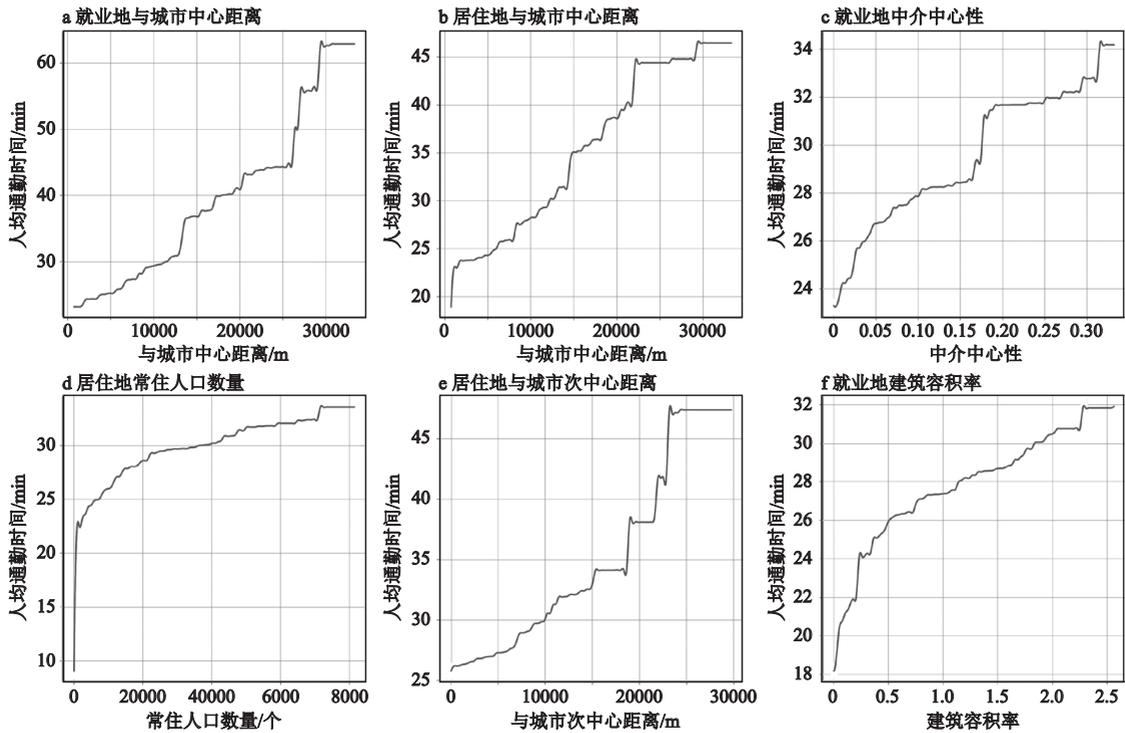


图 6 职住地建成环境对轨道交通通勤时间的非线性影响

Fig.6 Nonlinear influence of built environment of residence and workplace on commuter time

时间的影响存在差异。总体来看,居住地建成环境对地铁通勤客流量和通勤时间的影响均大于就业地,但对通勤行为影响最大的单项指标均位于就业地,例如就业地公司企业数量对通勤客流量影响最显著,贡献度占 13.5%,就业地与城市中心距离对通勤时间影响最显著,贡献度占 12.9%。这可以为在有限资源条件下,明确规划实践与开发建设的优先级提供指导性意见。

3) 职住地两端建成环境对通勤客流和通勤时间普遍呈现复杂的非线性影响。地铁周边合理的设施配套和有效的建成环境控制可提高地铁使用率,但过度开发可能导致资源浪费和交通拥堵。例如,就业地公司企业数量在 80~300 个之间时,对地铁客流有显著正向影响,但超过 300 个后客流量增加不明显。因此,对于就业集中区,应控制公司企业数量在合理范围内,确保地铁开发与周边建成环境优化的协同发展,增强城市功能的均衡适配。

3.2 讨论

当前,中国大城市职住空间分离等城市问题日益凸显,引起社会广泛关注^[11,26],本文探索职住两地建成环境对居民地铁通勤行为的影响机制,对缓解长距离通勤导致的职住空间失衡问题具有重要意义。结合社会实际,由研究结果衍生出如下的讨论:

1) 轨道交通的布局优化有利于缓解城市职住分离难题。本文研究结果发现,武汉地铁通勤主要集中在城市中心的主城区,长时间通勤主要是从城市外围向中心的通勤。这与武汉市通勤圈的研究结果一致^[26],这可能是因为武汉市城市外围的功能配套、产业发展还不充分,不得以向城市中心集聚以寻求就业岗位。因此,城市轨道交通及配套设施的布局应优先围绕服务城市中心区的高强度通勤、以及远距离的跨区通勤为主,同时逐步提高城市外围区域的地铁建设,通过提升站点周边土地利用混合度、提高土地开发强度以及降低地铁线路绕行距离等缓解长距离地铁通勤,提升地铁的整体通勤效率。

2) 职住地两端不同建成环境变量的相对重要性有利于在有限资源的条件下明确规划实践和开发建设的优先级。在有限资源条件下应优先优化居住地和公司企业集中区域的建成环境,打造步行友好型、土地混合开发的建设模式更有利于促进轨道交通客流,达到鼓励公共交通出行的目的。研究结果说明武汉市多中心的城市格局虽已初步形成,但尚未能承担起分摊城市中心就业压力的作用。因此,

应基于武汉地铁通勤和职住分布特征构建以轨道交通为基础的“出行+生活”通勤圈,依据不同职住需求调整设施配套和功能布局,实现地铁对城市重点职住区域的有效衔接,并进一步强化城市次中心分摊就业压力和激活城市活力的作用,促进区域性站域人群出行与职住空间的合理匹配。

3) 复杂的非线性影响或阈值效应可以更科学地指导建成环境在有效范围内进行优化。依据研究结果,对于城市就业集中的区域应控制公司企业数量在 300 个左右,控制地铁开发和周边建成环境优化的协同发展,增强城市功能的均衡适配,以实现地铁站域范围内土地开发的集约化利用与合理控制。城市就业资源要进行合理规划和分配,激发城市次中心的就业活力和吸引力,避免居民过度的聚集式分布并适当控制城市中心的开发强度将有助于缩短通勤距离、降低通勤时间。未来的规划实践可以进一步依据职住地影响因素的阈值效应进行人口密度、土地利用混合度等指标的差异化定级,控制站点周边开发强度和建成环境的优化范围。但特别要注意的是,职住地两端建成环境变量对通勤客流和通勤时间都产生了影响,然而针对某一个特定的地铁站,它既是居住地也是就业地,这就提醒规划实践者及交通规划者在规划干预时,应确定轨道交通站点的主导功能,依靠主导功能进行站点优化,才可以获得更加有效的政策干预效果。

4) 本研究是结合职住地两端建成环境一同解析与轨道交通通勤行为关系的有益探索,但本文仍存在以下不足需要改进。首先,受限于数据的获取,未考虑每个站域内的各种通勤人员的社会属性,但这是影响居民通勤出行选择的重要影响要素^[13]。此外,本研究所使用的是截面数据,虽然从职住地两端探讨了建成环境对轨道交通通勤行为的非线性影响,但无法获得两者之间的因果关系。下一步研究可以考虑通过问卷调查和纵向设计来探索两者之间的动态变化过程和因果关系,进而更好的指导相关政策的制定及规划实践。

参考文献(References):

- [1] Hu L Q, Yang J W, Yang T R et al. Urban spatial structure and travel in China[J]. *Journal of Planning Literature*, 2020, 35(1): 6-24.
- [2] Ta N, Chai Y W, Zhang Y et al. Understanding job-housing relationship and commuting pattern in Chinese cities: Past, present and future[J]. *Transportation Research Part D: Trans-*

- port and Environment, 2017, 52: 562-573.
- [3] Yang L C, Zhang W. Evaluation of transport policy packages in the excess commuting framework: The case of Xiamen, China[J]. *Cities*, 2019, 87: 39-47.
- [4] 沈忱, 张纯, 夏海山, 等. 大都市圈职住空间关系与就业可达性: 交通基础设施的影响 [J]. *国际城市规划*, 2019, 34(2): 64-69. [Shen Chen, Zhang Chun, Xia Haishan et al. Job-Housing spatial relationship and job accessibility of metropolitan area: The influence of transportation infrastructure. *Urban Planning International*, 2019, 34(2): 64-69.]
- [5] Wu W J, Hong J. Does public transit improvement affect commuting behavior in Beijing, China? A spatial multilevel approach[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 52: 471-479.
- [6] Ewing R, Cervero R. Travel and the built environment: A meta-analysis[J]. *Journal of the American Planning Association*, 2010, 76(3): 265-294.
- [7] 赵鹏军, 孔璐. TOD 对北京市居民通勤影响及其机制研究 [J]. *人文地理*, 2017, 32(5): 125-131. [Zhao Pengjun, Kong Lu. The impact of TOD on residents' commuting activities: A case of Beijing. *Human Geography*, 2017, 32(5): 125-131.]
- [8] 陈小鸿, 周翔, 乔瑛瑶. 多层次轨道交通网络与多尺度空间协同优化——以上海都市圈为例 [J]. *城市交通*, 2017, 15(1): 20-30. [Chen Xiaohong, Zhou Xiang, Qiao Yingyao. Coordination and optimization of multilevel rail transit network and multi-scale spatial layout: A case study of Shanghai metropolitan area. *Urban Transport of China*, 2017, 15(1): 20-30.]
- [9] Huang J, Levinson D, Wang J et al. Tracking job and housing dynamics with smartcard data[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(50): 12710-12715.
- [10] Shao Q F, Zhang W J, Cao X Y et al. Threshold and moderating effects of land use on metro ridership in Shenzhen: Implications for TOD planning[J]. *Journal of Transport Geography*, 2020, 89: 102878.
- [11] Ding C, Cao X Y. How does the built environment at residential and work locations affect car ownership? An application of cross-classified multilevel model[J]. *Journal of Transport Geography*, 2019, 75: 37-45.
- [12] Sun B D, Ermagun A, Dan B. Built environmental impacts on commuting mode choice and distance: Evidence from Shanghai[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 52: 441-453.
- [13] Kamruzzaman M, Shatu F M, Hine J et al. Commuting mode choice in transit oriented development: Disentangling the effects of competitive neighbourhoods, travel attitudes, and self-selection[J]. *Transport Policy*, 2015, 42: 187-196.
- [14] Jun M J, Choi K, Jeong J E et al. Land use characteristics of subway catchment areas and their influence on subway ridership in Seoul[J]. *Journal of Transport Geography*, 2015, 48: 30-40.
- [15] Rodriguez D A, Kang C D. A typology of the built environment around rail stops in the global transit-oriented city of Seoul, Korea [J]. *Cities*, 2020, 100: 102663.
- [16] Yu Li X, Krishna Sinniah G, Li R W. Identify impacting factor for urban rail ridership from built environment spatial heterogeneity[J]. *Case Studies on Transport Policy*, 2022, 10(2): 1159-1171.
- [17] 孔祥夫, 杨家文. 土地利用视角下的轨道站点客流预测——以深圳市为例 [J]. *地理科学*, 2018, 38(12): 2074-2083. [Kong Xianguo, Yang Jiawen. A new method for forecasting station-level transit ridership from land-use perspective: The case of Shenzhen City. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(12): 2074-2083.]
- [18] Li S Y, Lyu D, Liu X P et al. The varying patterns of rail transit ridership and their relationships with fine-scale built environment factors: Big data analytics from Guangzhou[J]. *Cities*, 2020, 99: 102580.
- [19] Sun B D, Yin C. Impacts of a multi-scale built environment and its corresponding moderating effects on commute duration in China[J]. *Urban Studies*, 2020, 57(10): 2115-2130.
- [20] Gan Z X, Feng T, Wu Y T et al. Station-based average travel distance and its relationship with urban form and land use: An analysis of smart card data in Nanjing City, China[J]. *Transport Policy*, 2019, 79: 137-154.
- [21] 申犁帆, 张纯, 李赫, 等. 大城市通勤方式与职住失衡的相互关系 [J]. *地理科学进展*, 2018, 37(9): 1277-1290. [Shen Lifan, Zhang Chun, Li He et al. Interaction between commuting modes and job-housing imbalance in metropolis: An empirical study by bayesian-tobit analysis in Beijing. *Progress in Geography*, 2018, 37(9): 1277-1290.]
- [22] 王安琪, 彭建东, 任鹏, 等. 轨道站点周边建成环境对残疾人出行行为的影响研究——以武汉市 189 个轨道站点为例 [J]. *地理科学进展*, 2021, 40(7): 1127-1140. [Wang Anqi, Peng Jiandong, Ren Peng et al. Impact of the built environment of rail transit stations on the travel behavior of persons with disabilities: Taking 189 rail transit stations in Wuhan City as an example. *Progress in Geography*, 2021, 40(7): 1127-1140.]
- [23] Gan Z X, Yang M, Feng T et al. Examining the relationship between built environment and metro ridership at station-to-station level[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2020, 82: 102332.
- [24] Yang L C, Yu B J, Liang Y et al. Time-varying and non-linear associations between metro ridership and the built environment[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 132: 104931.
- [25] 崔叙, 喻冰洁, 杨林川, 等. 城市轨道交通出行的时空特征及影响因素非线性机制——基于梯度提升决策树的成都实证 [J]. *经济地理*, 2021, 41(7): 61-72. [Cui Xu, Yu Bingjie, Yang Linchuan et al. Spatio-temporal characteristics and non-linear influencing factors of urban rail transit: The case of Chengdu using the gradient boosting decision tree. *Economic Geography*, 2021, 41(7): 61-72.]

- [26] 郭亮, 毕瑜菲, 黄建中, 等. 大城市职住空间特征的多尺度比较与分析——以武汉为例 [J]. 城市规划学刊, 2018(5): 88-97. [Guo Liang, Bi Yufei, Huang Jianzhong et al. Multi-scale comparison and analysis of jobs-housing spatiale characteristics in big cities: Taking Wuhan as an example. Urban Planning Forum, 2018(5): 88-97.]
- [27] 刘泉. 轨道交通 TOD 地区的步行尺度 [J]. 城市规划, 2019, 43(3): 88-95. [Liu Quan. Walking scale of TOD area along rail transit line. City Planning Review, 2019, 43(3): 88-95.]
- [28] 张宁, 戴洁, 张晓军. 基于多项 Logit 模型的轨道交通站点步行接驳范围 [J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(5): 46-49. [Zhang Ning, Dai Jie, Zhang Xiaojun. Walking affect area of rail transit station based on multinomial logit model. Urban Mass Transit, 2012, 15(5): 46-49.]
- [29] Cervero R, Kockelman K. Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 1997, 2(3): 199-219.
- [30] Ewing R, Cervero R. Travel and the built environment: A synthesis[J]. *Transportation Research Record*, 2001, 1780(1): 87-114.
- [31] Huang J R, Chen S K, Xu Q et al. Relationship between built environment characteristics of TOD and subway ridership: A causal inference and regression analysis of the Beijing subway[J]. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 2022, 24: 100341.
- [32] Li S, Lyu D, Huang G et al. Spatially varying impacts of built environment factors on rail transit ridership at station level: A case study in Guangzhou, China[J]. *Journal of Transport Geography*, 2020, 82: 102631.
- [33] Shi Z B, Zhang N, Liu Y et al. Exploring spatiotemporal variation in hourly metro ridership at station level: The influence of built environment and topological structure[J]. *Sustainability*, 2018, 10(12): 4564.
- [34] 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 Jiao'e, Jin Haitao et al. Investigating spatiotemporal patterns of passenger flows in the Beijing metro system from smart card data. Progress in Geography, 37(3): 397-406.]
- [35] 任鹏, 彭建东, 杨红, 等. 武汉市轨道交通站点周边地区职住平衡与建成环境的关系研究 [J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(7): 1231-1245. [Ren Peng, Peng Jiandong, Yang Hong et al. Relationship between jobs-housing balance and built environment in areas around urban rail transit stations of Wuhan. Journal of Geo-information Science, 2021, 23(7): 1231-1245.]
- [36] Ma X L, Ding C, Luan S et al. Prioritizing influential factors for freeway incident clearance time prediction using the gradient boosting decision trees method[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18(9): 2303-2310.
- [37] Ding C, Cao X Y, Wang Y P. Synergistic effects of the built environment and commuting programs on commute mode choice[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2018, 118: 104-118.
- [38] Ding C, Cao X Y, Liu C. How does the station-area built environment influence metrorail ridership? Using gradient boosting decision trees to identify non-linear thresholds[J]. *Journal of Transport Geography*, 2019, 77: 70-78.
- [39] Friedman J H. Greedy function approximation: A gradient boosting machine[J]. *Annals of Statistics*, 2001, 29(5): 1189-1232.
- [40] Saha D, Alluri P, Gan A. Prioritizing highway safety manual's crash prediction variables using boosted regression trees[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2015, 79: 133-144.
- [41] 钟敏慧, 张婉露, 李有儒, 等. 基于 GBDT 的铁路事故类型预测及成因分析 [J]. 自动化学报, 2022, 48(2): 470-478. [Zhong Minhui, Zhang Wanlu, Li Youru et al. GBDT based railway accident type prediction and cause analysis. Acta Automatica Sinica, 2022, 48(2): 470-478.]
- [42] Ding C, Cao X Y, Naess P. Applying gradient boosting decision trees to examine non-linear effects of the built environment on driving distance in Oslo[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2018, 110: 107-117.
- [43] 郭亮, 郑朝阳, 黄建中, 等. 基于通勤圈识别的大城市空间结构优化——以武汉市中心城区为例 [J]. 城市规划, 2019, 43(10): 43-54. [Guo Liang, Zheng Chaoyang, Huang Jianzhong et al. Commuting circle-based spatial structure optimization of megacities: A case study of Wuhan City. City Planning Review, 2019, 43(10): 43-54.]
- [44] 张纯, 易成栋, 宋彦. 北京市职住空间关系特征及变化研究——基于第五、六次人口普查和 2001、2008 年经济普查数据的实证分析 [J]. 城市规划, 2016, 40(10): 59-64. [Zhang Chun, Yi Chengdong, Song Yan. Characteristics of job-housing spatial relationship and changes in Beijing: An empirical study based on data from the 5th, 6th population census and economy census in 2011 and 2008. City Planning Review, 2016, 40(10): 59-64.]
- [45] Zhao J B, Deng W, Song Y et al. What influences metro station ridership in China? Insights from Nanjing[J]. *Cities*, 2013, 35: 114-124.
- [46] An D, Tong X, Liu K et al. Understanding the impact of built environment on metro ridership using open source in Shanghai[J]. *Cities*, 2019, 93: 177-187.
- [47] 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.
- [48] 汪光焘, 王继峰, 赵珺玲. 新时期城市交通需求演变与展望 [J]. 城市交通, 2020, 18(4): 1-10. [Wang Guangtao, Wang Jifeng, Zhao Junling. Evolution of urban travel demand in the new era. Urban Transport of China, 2020, 18(4): 1-10.]
- [49] Choi J, Lee Y J, Kim T et al. An analysis of metro ridership at the station-to-station level in Seoul[J]. *Transportation*, 2012, 39(3): 705-722.

Non-linear influencing of built environment of residence and workplace on rail transit commuting behavior: Taking Wuhan City as an example

Peng Jiandong¹, Zhang Yuanhang¹, Shen Lifan², Dai Qi³, Yang Hong⁴

(1. School of Urban Design, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China; 2. School of Economics and Management, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China; 3. Wuhan Planning and Design Institute, Wuhan 430014, Hubei, China; 4. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China)

Abstract: Since the reform and opening up, the rapid expansion of Chinese city leads to the separation of occupation and housing and traffic congestion. Rail transit is an important means of relieving commuting pressure in cities. Current studies mainly explore the effect of built environment on rail transit commuting based on the geographical background of residence, but less explore the effect of built environment at workplace. Taking Wuhan City as an example, this study identified rail transit commuters and constructed commuter travel chain through smart card data of 189 stations. Gradient Boosting Decision Tree (GBDT) was used to analyze the nonlinear influence mechanism of 30 factors, including the built environment of residence and subway station characteristics, on commuter ridership and commute time. The results show that: 1) The commuter ridership in residential areas presents a centralized point-like distribution, and the commuter ridership in employment areas presents a significant “center-periphery” structure, and the spatial pattern of commuting time of residence and workplace presents a low distribution in the middle and high distribution in the periphery. 2) All job residence built environment factors on the rail transit commuter ridership and commuting time is widespread nonlinear effect and the threshold effect, overall residence built environment relative influence degree is higher than the workplace, but the job the company formed in workplace is the most important factors affect the commuter ridership, the distance between workplace and city center is the most important element in commuting time; 3) The same built environment factor of residence and workplace may have similar or opposite effects on the commuter ridership and commuting time, which is related to the construction of urban rail transit network and the actual social development. The results of this study can better correlate the built environment of dismissal residence with the commuter characteristics of rail transit, and contribute to the coordinated development of rail transit and urban employment-residential space.

Key words: job-housing relationship; the built environment; urban rail transit; commuting behavior; gradient boosting decision tree; Wuhan City