

自驾偏好、居民异质与居住选址^①

——基于单中心城市模型的空间均衡分析

徐淑贤^{1,2}, 刘天亮^{2*}, 黄海军², 刘蓉晖³

(1. 天津大学管理与经济学部, 天津 300072; 2. 北京航空航天大学经济管理学院/复杂系统分析与
管理决策教育部重点实验室, 北京 100191; 3. 英国利兹大学交通研究所, 英国 LS2 9JT)

摘要: 基于线性单中心城市模型, 研究了自驾偏好和居民拥有车辆异质性对双方式交通走廊沿线居民出行方式选择和居住区位选址均衡的影响. 将有车居民对自驾出行的偏好集成到直接效用函数中, 建立了空间均衡模型. 分析发现, 当城市居民全部自驾出行时, 租金-距离可能呈现先提高后降低的趋势. 考虑只有部分居民拥有自驾车辆的一般情形, 推导出了有车和无车居民在城市走廊沿线居住分布的不同均衡模式. 通过理论解析, 进一步考察了小汽车保有量和城市居民数量的变化对城市空间结构和居民效用水平的影响.

关键词: 单中心城市; 城市空间均衡; 居住区位选址; 小汽车拥有权

中图分类号: U491 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2020)06-0073-17

0 引言

随着经济的快速增长以及城市化进程的加强, 世界各国小汽车保有量急剧增加. 以中国为例, 2016年年末全国民用汽车保有量达到1.94亿辆, 其中私人汽车保有量1.46亿辆, 与2015年相比增长15.08%. 全国平均每百户家庭拥有36辆小汽车, 深圳、成都、苏州等城市每一百户家庭小汽车保有量超过70辆^[1]. 由于小汽车高效、便捷的优点, 人们的出行模式更趋向于使用小汽车而不是乘坐公共交通工具. 随着城市居民出行小汽车化趋势的加强, 城市交通拥堵、城市安全、空气污染等问题日趋严峻.

在快速城市化背景下, 如何应对小汽车私有化增加这一重大变化, 是城市规划和交通规划面临的重要议题. 一方面, 私人小汽车保有量的增加对城市居民的出行选择产生直接的影响, 许多研

究表明小汽车拥有直接影响出行模式的选择行为^[2,3]. 基于荷兰全国流动小组的调查结果, Kitamura^[4]发现小汽车保有量的增加明显导致小汽车的使用增加, 而降低公交的使用率. 有车用户在出行时可以选择小汽车或者公共交通出行模式, 而无车用户只能选择公共交通出行. Chiou等人^[5]使用台湾的问卷调查结果发现虽然有车用户只占52.6%, 但他们选择小汽车自驾出行的概率高达94%. 另一方面, 小汽车私有化会使得居民倾向于选择住房空间更大的远郊区居住, 从而影响到城市形态和空间结构. 研究小汽车保有量、居民出行与居住选址之间的内在关系对于城市的可持续发展具有重要意义.

城市交通与城市空间结构之间复杂的互动关系很早就引起了国内外学者的关注. 经典的单中心城市模型^[6-8]阐释了城市空间结构和交通出行之间的交互关系. 在只有单一交通模式的线性单

① 收稿日期: 2018-07-31; 修订日期: 2019-12-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71801172; 71771007; 71890971/71890970; 71961137001).

通讯作者: 刘天亮(1981—), 男, 山东济宁人, 博士, 副教授. Email: liutianliang@buaa.edu.cn

中心城市中,城市居民在交通出行和住房之间权衡,导致土地或住房租金价格随离 CBD 的距离的增加而递减.这个结论得到了一些理论和实证研究工作的印证和支持^[9, 10].然而也有一些研究发现,在离 CBD 较近的一段区域内,土地或住房租金并不是随距离的增加而降低的.例如,Richardson^[11]发现当考虑邻居效应时,租金价格可能随离 CBD 的距离的增加而增加.一些研究假说进一步被提出来解释租金与距离的正比关系,如多中心城市结构的影响^[12],环境外部性的影响^[13]和城市便利性的影响^[14, 15]等.在城市化和小汽车私有化的背景下,本文的第一个贡献是探讨有车居民对自驾出行的偏好给城市系统带来的影响.具体地,假定有车用户的出行模式选择行为服从 Logit 形式,该假设在交通出行研究领域广泛使用^[16, 17].在这里选择自驾出行的概率只是有限理性地受相对出行成本的影响和支配.

现代城市中,居民居住分离现象比较普遍.许多学者基于居民收入水平的不同对这一现象进行了研究^[18~20].在上述研究中,居民的出行模式选择是根据出行成本最小化来进行的,前提假设是居民全部拥有自驾车辆,且是完全理性的.然而现实中,只有部分城市居民拥有自驾车辆,居民小汽车拥有情况的不同显著影响着他们的出行选择行为.因此,本文的第二个贡献是基于小汽车拥有情况的不同,探讨有车居民和无车居民在城市中的空间分布情况.

本文将城市居民对自驾出行的偏好以及拥有小汽车的异质性,引入到经典的线性单中心城市模型分析框架之中,建立了基于居民出行方式选择和住房竞争选址的线性双方式交通走廊空间均衡模型.首先,在有车居民的直接效用函数中显式集成了其对自驾出行的偏好,研究了这一自驾偏好对单位住房租金价格和住房面积的影响.其次,考虑只有部分居民拥有自驾车辆的一般情形,内生确定了城市走廊沿线的住房租金价格以及有车和无车居民的居住区位分布和住房面积,推导出了两种典型的空间均衡

模式.通过比较静态分析,进一步研究了小汽车保有量和城市居民数量的变化对城市边界和居民效用水平的影响.

1 模型构建

考虑城市居民对自驾出行的偏好以及小汽车拥有情况的异质性,本文扩展了经典的线性单中心城市空间均衡模型,来研究小汽车保有量和城市居民数量的变化对城市系统(城市边界、居民区位选址分布以及居民效用水平等)的影响.为了便于展现本文的主要观点并不失一般性,提出如下基本假设.

假设 1 考虑一个封闭的线性单中心城市.这意味着城市中的居民总数(N)是外生给定的,并且所有的居民都到 CBD 上班.该假设在基于单中心城市模型的理论研究中被广泛采用.

假设 2 基于小汽车拥有情况的异质性,城市居民分为两类:有车居民和无车居民.他们的收入水平是不相同的,但是他们的收入都用于交通出行、住房以及其他商品的消费.

假设 3 无车居民的出行方式为公交出行,且其消费行为服从关于非住房消费品和住房消费量的柯布-道格拉斯效用函数.

假设 4 有车居民既可以选择小汽车自驾出行,也可以选择公交出行,且他们对出行方式的选择满足 Logit 形式.除了非住房消费品和住房面积外,他们对自驾出行的偏好也直接影响效用水平.本文用城市居民选择小汽车自驾出行的概率来表示这一自驾偏好.

基于以上假设,本文探讨了有车居民和无车居民的出行方式选择、消费选择以及居住区位选址行为之间的交互影响,如图 1 所示.对于每类居民,他们在其预算约束范围通过选择最优的居住区位、住房面积和非住房消费品数量,以使其效用最大化,进而决定两类居民能够支付的单位住房面积的最高价格.在一个完全竞争市场中,基于竞租理论决定有车居民和无车居民的最终居住区位以及每个居住位置的租金价格.

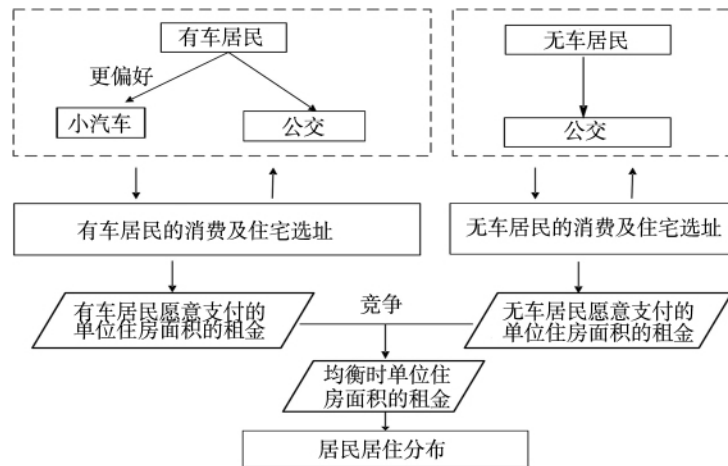


图 1 模型基本框架

Fig. 1 Basic model framework

1.1 有车居民的选择行为

1.1.1 有车居民的出行方式选择

根据假设 4, 有车居民从居住位置到 CBD 有两种出行方式可以选择: 小汽车或公交. 假设从居住位置 x 处到 CBD 的日出行成本是距离 x 的增函数, 成本函数为

$$C_{ci}(x) = 2(f_i + t_{ci}x) \quad (1)$$

其中 $i = 1, 2$ 分别代表小汽车自驾和公交出行; f_i 表示方式 i 单程的固定成本, 包括与出行距离无关的所有成本; t_{ci} 表示方式 i 每单位距离的边际成本(主要是时间成本和货币成本), 因此 $t_{ci}x$ 表示单程的可变成本, 包括与出行距离相关的所有成本. 与自驾车居民相比, 公交居民出行的固定成本更低而边际成本更高. 这一假设在一定程度上符合现实: 相对公交出行而言, 小汽车出行的固定成本包括燃油费、保险、维修费等, 而公交出行的固定成本通常指与距离无关的固定票价部分, 其相对较低, 因此可以视为小汽车出行具有较高的固定成本; 公交出行的可变成本主要是时间成本部分, 公交出行中由于公交车运行速度相对较慢, 公交车内出行时间通常高于自驾出行时间, 因而具有较高的可变成本. 为了便于分析, 且保证两种出行方式均可能被使用, 本文进一步假设 $f_1 > f_2$ 以及 $t_{c1} < t_{c2}$ 成立. 值得注意的是, 式(1)中的出行成本表达式没有考虑现实中交通拥挤的内生影响, 仅适用于由拥挤导致的额外出行时间成本相对其他与距离有关的出行成本低得多的情形. 这个简化的出行成本假设为本文解析性质的推导提

供了方便. 由于篇幅限制, 未来的研究工作将扩展考虑更为现实的情形.

对于有车居民而言, 他们的出行方式选择依赖于日期望出行成本, 表达如下

$$PC_i(x) = C_{ci}(x) + \varepsilon_i(x) \quad (2)$$

其中 $C_{ci}(x)$ 表示使用方式 i 出行的日出行成本, 参见式(1); $\varepsilon_i(x)$ 是随机误差项. 假设所有的随机误差项是独立同分布且均值为 0, 方差为 σ 的 Gumbel 变量, 那么出行方式选择的比例服从 Logit 模型

$$P(x) = (1 + \exp(\theta(C_{c1}(x) - C_{c2}(x))))^{-1} \quad (3)$$

其中 $\theta = \pi/\sqrt{6\sigma}$. 式(3)对 x 求导可得

$$\begin{aligned} \frac{dP(x)}{dx} &= 2\theta \exp(\theta(C_{c1}(x) - C_{c2}(x))) \times \\ &\quad (t_{c2} - t_{c1}) \left(\sum_{j=1,2} \exp(-\theta C_{cj}(x)) \right)^{-2} \\ &> 0 \end{aligned} \quad (4)$$

由于 $t_{c1} < t_{c2}$, 因此根据式(4)可知, 选择小汽车自驾出行的概率随着通勤距离的增加而提高. 进而, 可求得区位 x 处有车居民的日期望出行成本为

$$C_c(x) = -\frac{1}{\theta} \ln \left(\sum_{j=1,2} \exp(-\theta C_{cj}(x)) \right) \quad (5)$$

式(5)对 x 求导得

$$\begin{aligned} \frac{dC_c(x)}{dx} &= \frac{2\exp(-\theta C_{c1}(x))t_{c1} + 2\exp(-\theta C_{c2}(x))t_{c2}}{\sum_{j=1,2} \exp(-\theta C_{cj}(x))} \\ &> 0 \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)说明有车居民的日期望出行成本随着通勤距离的增加而增加.

1.1.2 有车用户的消费及住宅区位选择

根据假设4,有车居民选择最优的居住区位以使其在预算约束内获得最大的效用.

$$U_c(x) = \max_{z_c(x), q_c(x)} V_c(z_c(x), q_c(x), P(x)) \quad (7)$$

$$\text{s. t. } z_c(x) + R_c(x) q_c(x) = Y_c - \varphi C_c(x) - F \quad (8)$$

其中 $U_c(x)$ 是有车居民的间接效用函数, $V_c(z_c(x), q_c(x), P(x))$ 是有车居民的直接效用函数, $z_c(x)$ 为区位 x 处的年均非住房商品消费量,其价格单位化为1; $q_c(x)$ 为区位 x 处的住房消费量(也就是土地消费量), $P(x)$ 为区位 x 处选择小汽车出行的概率,见式(3). $R_c(x)$ 为区位 x 处每单位面积住房的年均价格.如式(5)所定义, $C_c(x)$ 是区位 x 处的年出行成本, φ 为年均出行天数, F 为分摊到每一个消费周期的购买小汽车的固定成本. Y_c 是有车居民的年工资.为了便于分析,本文采用柯布-道格拉斯效用函数形式 $V_c(z_c(x), q_c(x), P(x)) = z_c(x)^\alpha q_c(x)^\beta P(x)$ (9) 式中 $\alpha, \beta > 0, \alpha + \beta = 1, 0 \leq P(x) \leq 1$, 代表居民对自驾出行的偏好.式(9)反映出由于有车居民对自驾出行的偏好行为导致其效用水平发生变化.特别地,根据式(3),当 $\theta = 0$ 时,有车居民的出行方式选择完全随机,式(9)中的效用函数变为

$$V_c(z_c(x), q_c(x), P(x)) = 0.5z_c(x)^\alpha q_c(x)^\beta$$

当 $\theta = +\infty$ 时,有车居民的出行方式选择行为是完全理性的且完全偏好自驾出行,此时效用函数变为

$$V_c(z_c(x), q_c(x), P(x)) = \begin{cases} 0, & x < \frac{f_1 - f_2}{t_{c2} - t_{c1}} \\ z_c(x)^\alpha q_c(x)^\beta, & x \geq \frac{f_1 - f_2}{t_{c2} - t_{c1}} \end{cases}$$

$$A_1 = \frac{- (2\theta(Y_c - \varphi C_c(x) - F) \exp(-\theta C_{c1} - \theta C_{c2}) + 2\varphi \exp(-2\theta C_{c1})) t_{c1} + (\exp(-\theta C_{c1}) + \exp(-\theta C_{c2}))^2}{(2\theta(Y_c - \varphi C_c(x) - F) - 2\varphi) \exp(-\theta C_{c1} - \theta C_{c2}) t_{c2} (\exp(-\theta C_{c1}) + \exp(-\theta C_{c2}))^2}$$

将预算约束式(8)中的 $z_c(x)$ 代入到式(9),那么其关于 $q_c(x)$ 的一阶导数等于0为

$$-\frac{\partial V}{\partial z_c} R_c(x) + \frac{\partial V}{\partial q_c} = 0 \quad (10)$$

进而得到住房消费量 $q_c(x)$ 为

$$q_c(x) = \frac{\beta(Y_c - \varphi C_c(x) - F)}{R_c(x)} \quad (11)$$

在均衡状态,有车居民无论居住何处都具有相同的效用水平 u_c ,因此有

$$u_c = [Y_c - \varphi C_c(x) - F - R_c(x) q_c(x)]^\alpha \times q_c(x)^\beta P(x) \quad (12)$$

联立式(11)和式(12),可推出 $R_c(\cdot)$ 和 $q_c(\cdot)$ 是关于 u_c 的函数

$$R_c(x, u_c) = \alpha^{\frac{\alpha}{\beta}} \beta (Y_c - \varphi C_c(x) - F)^{\frac{1}{\beta}} \times u_c^{-\frac{1}{\beta}} P(x)^{\frac{1}{\beta}} \quad (13)$$

$$q_1(x, u_c) = \alpha^{-\frac{\alpha}{\beta}} (Y_c - \varphi C_c(x) - F)^{-\frac{\alpha}{\beta}} \times u_c^{\frac{1}{\beta}} P(x)^{-\frac{1}{\beta}} \quad (14)$$

显然,式(13)和式(14)表明,给定效用水平 u_c , 住房租金价格 $R_c(x, u_c)$ 随着日期望出行成本的增加而降低,而随着选择小汽车出行概率的增大而提高;住房消费量 $q_c(x, u_c)$ 则随着日期望出行成本的增加而增大,而随着选择小汽车出行概率的增大而减小.

性质1 当 $1 - \frac{\varphi}{\theta(Y_c - \varphi C_c(0) - F)} \leq \frac{t_{c1}}{t_{c2}}$ 时,

住房租金价格随离 CBD 距离的增加而降低.

证明 式(13)对 x 求导得

$$\frac{dR_c}{dx} = \alpha^{\frac{\alpha}{\beta}} \beta u_c^{-\frac{1}{\beta}} (Y_c - \varphi C_c(x) - F)^{\frac{\alpha}{\beta}} P(x)^{\frac{\alpha}{\beta}} \times \left(-\varphi P(x) \frac{dC_c}{dx} + (Y_c - \varphi C_c(x) - F) \frac{dP}{dx} \right)$$

令 $A_1 = -\varphi P(x) \frac{dC_c}{dx} + (Y_c - \varphi C_c(x) - F) \frac{dP}{dx}$, 并

且将式(4)和式(6)代入得

当 $1 - \frac{\varphi}{\theta(Y_c - \varphi C_c(0) - F)} \leq \frac{t_{c1}}{t_{c2}}$ 时, 易知 $1 - \frac{\varphi}{\theta(Y_c - \varphi C_c(x) - F)} < \frac{t_{c1}}{t_{c2}}$. 也就是

$$\frac{t_{c1}}{t_{c2}} > \frac{(\theta(Y_c - \varphi C_c(x) - F) - \varphi) \exp(-\theta C_{c1} - \theta C_{c2})}{\theta(Y_c - \varphi C_c(x) - F) \exp(-\theta C_{c1} - \theta C_{c2})} > \frac{(2\theta(Y_c - \varphi C_c(x) - F) - 2\varphi) \exp(-\theta C_{c1} - \theta C_{c2})}{(2\theta(Y_c - \varphi C_c(x) - F) \exp(-\theta C_{c1} - \theta C_{c2}) + 2\varphi \exp(-2\theta C_{c1}))},$$

表明 $A_1 < 0$. 因此, 得到 $\frac{dR_c}{dx} < 0$, 说明住房租金 定满足 $1 - \frac{\varphi}{\theta(Y_c - \varphi C_c(0) - F)} \geq \frac{t_{c1}}{t_{c2}}$.

价格随着距离 CBD 的距离的增加而降低. 证毕.

推论 1 当考虑有车居民对自驾出行的偏好影响时, 若租金 - 距离关系存在正向相关, 那么一

证明 当 $\frac{dR_c}{dx} > 0$ 时, 有

$$\frac{(2\theta(Y_c - \varphi C_c(x) - F) - 2\varphi) \exp(-\theta C_{c1} - \theta C_{c2})}{(2\theta(Y_c - \varphi C_c(x) - F) \exp(-\theta C_{c1} - \theta C_{c2}) + 2\varphi \exp(-2\theta C_{c1}))} > \frac{t_{c1}}{t_{c2}}$$

由于 $1 - \frac{\varphi}{\theta(Y_c - \varphi C_c(0) - F)} > \frac{(2\theta(Y_c - \varphi C_c(x) - F) - 2\varphi) \exp(-\theta C_{c1} - \theta C_{c2})}{(2\theta(Y_c - \varphi C_c(x) - F) \exp(-\theta C_{c1} - \theta C_{c2}) + 2\varphi \exp(-2\theta C_{c1}))}$,

因此有 $1 - \frac{\varphi}{\theta(Y_c - \varphi C_c(0) - F)} \geq \frac{t_{c1}}{t_{c2}}$. 证毕.

证明 当 $\frac{dR_c}{dx} = 0$ 时, 有

性质 2 当住房租金 - 距离关系不是单调时, 住房租金价格随距离 CBD 的距离的增加先增加后降低.

$$\varphi P(x) \frac{dC_c}{dx} = (Y_c - \varphi C_c(x) - F) \frac{dP}{dx}$$

租金 R_c 对 x 求二次导, 得到

$$\begin{aligned} \frac{d^2 R_c}{dx^2} &= \alpha^{\frac{\alpha}{\beta}} \frac{1}{\beta} u_c^{-\frac{1}{\beta}} (Y_c - \varphi C_c(x) - F)^{\frac{\alpha-\beta}{\beta}} P(x)^{\frac{\alpha-\beta}{\beta}} (\alpha (Y_c - \varphi C_c(x) - F)^2 \left(\frac{dP}{dx}\right)^2 + \alpha \varphi^2 P(x)^2 \left(\frac{dC_c}{dx}\right)^2) + \\ &\quad \frac{d^2 P}{dx^2} \beta (Y_c - \varphi C_c(x) - F)^2 P(x) - \beta \varphi (Y_c - \varphi C_c(x) - F) P(x)^2 \frac{d^2 C_c}{dx^2} - 2\varphi P(x) (Y_c - \varphi C_c(x) - F) \frac{dC_c}{dx} \frac{dP}{dx} \end{aligned}$$

简化上式可得

$$\begin{aligned} \frac{d^2 R_c}{dx^2} &= \alpha^{\frac{\alpha}{\beta}} u_c^{-\frac{1}{\beta}} (Y_c - \varphi C_c(x) - F)^{\frac{\alpha}{\beta}} P(x)^{\frac{\alpha-\beta}{\beta}} \left(-2 \left(\frac{dP}{dx}\right)^2 + P(x) \frac{d^2 P}{dx^2} - P(x) \frac{dP}{dx} \frac{d^2 C_c}{dx^2} / \frac{dC_c}{dx} \right) \\ &= A_2 \frac{4\theta^2 (t_{c2} - t_{c1})^2}{(\exp(-\theta C_{c1} - \theta C_{c2}))^4} \left(-\exp(-2\theta C_{c1} - 2\theta C_{c2}) - \exp(-3\theta C_{c1} - \theta C_{c2}) + \frac{\exp(-3\theta C_{c1} - 2\theta C_{c2}) (t_{c2} - t_{c1})}{\exp(-\theta C_{c1}) t_{c1} + \exp(-\theta C_{c2}) t_{c2}} \right) \\ &= A_3 \left(-\exp(-2\theta C_{c1} - 2\theta C_{c2}) - \exp(-3\theta C_{c1} - \theta C_{c2}) + \frac{\exp(-3\theta C_{c1} - 2\theta C_{c2}) (t_{c2} - t_{c1})}{\exp(-\theta C_{c1}) t_{c1} + \exp(-\theta C_{c2}) t_{c2}} \right) \end{aligned}$$

显然可知 $\frac{d^2 R_c}{dx^2} < 0$, 表明住房租金曲线是关于通勤距离的凸函数. 证毕.

根据性质 1 和性质 2, 以及为了分析方便, 给出两种租金 - 距离关系的定义.

定义 1 (租金 - 距离关系) (a) 当满足条件

$$1 - \frac{\varphi}{\theta(Y_c - \varphi C_c(0) - F)} \leq \frac{t_{c1}}{t_{c2}}$$

CBD 的距离的增加而降低, 这种情形称之为情形

(a); (b) 当满足条件 $1 - \frac{\varphi}{\theta(Y_c - \varphi C_c(0) - F)} >$

$\frac{t_{c1}}{t_{c2}}$ 时, 租金价格随离 CBD 的距离的增加先提高

后降低, 这种情形称之为情形 (b).

1.2 无车居民的选择行为

对于无车居民而言, 非住房商品的消费量和

住房消费量影响其效用水平. 无车居民在选择住宅区位时在其预算约束范围内最大化其效用水平. 其效用函数服从柯布-道格拉斯效用函数形式, 该最大化问题可表示为

$$U_{nc}(x) = z_{nc}(x)^\alpha q_{nc}(x)^\beta, \alpha, \beta > 0, \alpha + \beta = 1 \tag{15}$$

$$\text{s. t. } z_{nc}(x) + R_{nc}(x)q_{nc}(x) = Y_{nc} - \varphi C_{nc}(x) \tag{16}$$

其中 $U_{nc}(x)$ 为无车居民的间接效用函数, $V_{nc}(z_{nc}(x), q_{nc}(x))$ 是无车居民的直接效用函数, $z_{nc}(x)$ 为区位 x 处的年均非住房商品消费量, 其价格单位化为 1; $q_{nc}(x)$ 为区位 x 处的住房消费量, $R_{nc}(x)$ 为区位 x 处每单位面积住房的年均价格. $C_{nc}(x)$ 是区位 x 处的年出行成本, 表示为 $C_{nc}(x) = 2(f_2 + t_{nc2}x)$, φ 为年均出行天数, Y_{nc} 是无车居民的年工资.

在均衡状态, 无车居民居住何处都具有相同的效用水平 u_{nc} . 同有车居民的效用最大化问题的求解, 得到无车居民在区位 x 处的住房租金价格 $R_{nc}(\cdot)$ 和住房消费量 $q_{nc}(\cdot)$ 如下:

$$R_{nc}(x, u_{nc}) = \alpha^\beta \beta (Y_{nc} - \varphi C_{nc}(x))^\beta u_{nc}^{-\frac{1}{\beta}} \tag{17}$$

$$q_{nc}(x, u_{nc}) = \alpha^{-\frac{\alpha}{\beta}} (Y_{nc} - \varphi C_{nc}(x))^{-\frac{\alpha}{\beta}} u_{nc}^{\frac{1}{\beta}} \tag{18}$$

式(17)和式(18)表明, 给定效用水平, 随着出行距离的增加, 住房租金价格降低, 而住房消费量增加.

2 城市系统均衡

定义区位 x 处的住房租金价格为居住在 x 处的居民在给定效用水平下愿意支付的最高价格. 因此, 均衡时, 区位 x 处的住房租金价格为有车居民和无车居民愿意支付的住房价格的最大者, 表示为

$$R(x) = \max\{R_c(x, u_c), R_{nc}(x, u_{nc})\} \tag{19}$$

而且, 在均衡状态, 城市边界 B 处的租金价格等于农业租金价格 r_a , 即

$$R(B) = r_a \tag{20}$$

在城市系统达到均衡时, 不同的城市系统参

数设置可能导致不同的居民分布模式. 基于给定的基本假设, 存在两种均衡居住分布模式.

定义 2 (居民分布模式) (I) ‘NC + C’ 模式, 即所有的无车居民居住在 CBD 附近, 而有车居民居住在远郊; (II) ‘NC + C + NC’ 模式, 即一部分无车居民居住在 CBD 附近而另一部分居住在城市边界附近, 而有车居民居住在城市的中部地区.

性质 3 当 $\frac{t_{nc2}}{Y_{nc} - 2\varphi f_2} > \frac{t_{c2}}{Y_c - F - 2\varphi f_2}$ 时, 居民分布服从 ‘NC + C’ 模式.

证明 当 $\frac{t_{nc2}}{Y_{nc} - 2\varphi f_2} > \frac{t_{c2}}{Y_c - F - 2\varphi f_2}$, 容易推出 $\frac{t_{nc2}}{Y_{nc} - 2\varphi t_{nc2}\bar{x} - 2\varphi f_2} > \frac{t_{c2}}{Y_c - F - 2\varphi t_{c2}\bar{x} - 2\varphi f_2}$, 其中 \bar{x} 表示靠近 CBD 附近的两类居民的居住分离点, 即 $\frac{t_{nc2}}{Y_{nc} - \varphi G_{nc2}(\bar{x})} > \frac{t_{c2}}{Y_c - F - \varphi G_c(\bar{x})}$. 根据式(5)和式(6), 有 $G_{c2}(\bar{x}) < C_c(\bar{x})$ 以及 $t_{c2} > 0.5 \frac{dC_c}{dx}$. 因此,

可知 $\frac{t_{nc2}}{Y_{nc} - \varphi G_{nc2}(\bar{x})} > \frac{t_{c2}}{Y_c - F - \varphi G_{c2}(\bar{x})} > \frac{t_{c2}}{Y_c - F - \varphi C_c(\bar{x})} > \frac{0.5dC_c/dx}{Y_c - F - \varphi C_c(\bar{x})}$. 进而有 $\frac{\varphi dG_{nc2}/dx}{Y_{nc} - \varphi G_{nc2}(\bar{x})} > \frac{\varphi dC_c/dx}{Y_c - F - \varphi C_c(\bar{x})} > \frac{\varphi dC_c/dx}{Y_c - F - \varphi C_c(\bar{x})} = \frac{dP/dx}{P(\bar{x})}$, 即 $\frac{dR_{nc}(\bar{x})}{dx} < \frac{dR_c(\bar{x})}{dx}$. 因此, 服从 ‘NC + C’ 模式. 证毕.

推论 2 当居民空间分布模式服从 ‘NC + C + NC’ 时, 满足 $\frac{t_{nc2}}{Y_{nc} - 2\varphi f_2} < \frac{t_{c2}}{Y_c - F - 2\varphi f_2}$.

证明 如果居民空间分布模式服从 ‘NC + C + NC’, 那么在城市边界附近的居民居住分离点 \tilde{x} 处满足 $\frac{dR_{nc}(\tilde{x})}{dx} > \frac{dR_c(\tilde{x})}{dx}$, 也就是 $\frac{\varphi dG_{nc2}/dx}{Y_{nc} - \varphi G_{nc2}(\tilde{x})} < \frac{\varphi dC_c/dx}{Y_c - F - \varphi C_c(\tilde{x})} - \frac{dP/dx}{P(\tilde{x})}$. 由于出行成本是通勤距离的增函数, 因此有 $\frac{\varphi dG_{nc2}/dx}{Y_{nc} - \varphi G_{nc2}(0)} > \frac{\varphi dG_{nc2}/dx}{Y_{nc} - \varphi G_{nc2}(\tilde{x})}$.

而且 $\frac{\varphi dC_c/dx}{Y_c - F - \varphi C_c(\tilde{x})} - \frac{dP/dx}{P(\tilde{x})} < \frac{\varphi dC_c/dx}{Y_c - F - \varphi C_c(\tilde{x})} < \frac{\varphi dG_{c2}/dx}{Y_c - F - \varphi C_c(\tilde{x})} < \frac{\varphi dG_{c2}/dx}{Y_c - F - \varphi G_{c2}(0)}$ 是成立的. 因此, 可知 $\frac{\varphi dG_{nc2}/dx}{Y_{nc} - \varphi G_{nc2}(0)} < \frac{\varphi dG_{c2}/dx}{Y_c - F - \varphi G_{c2}(0)}$. 证毕.

居民居住分布模式(I) 根据定义 2, 在 ‘NC + C’ 模式下, 所有的无车居民居住在 CBD 附近, 而有车用户住在远郊区, 如图 2 所示. 在均衡状态, 满足以下条件

$$R_c(x_0, u_c) = R_{nc}(x_0, u_{nc}) \quad (21)$$

$$R_c(B, u_c) = r_a \quad (22)$$

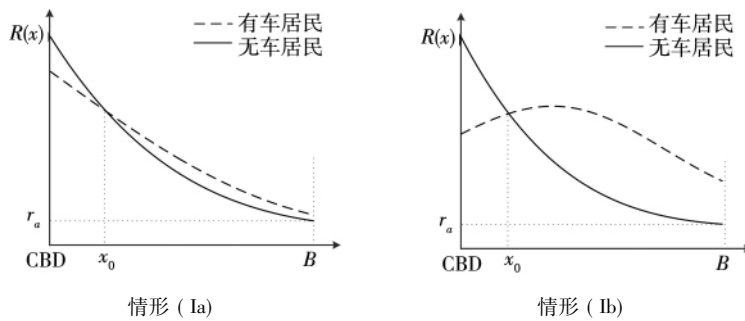


图 2 ‘NC + C’ 模式下两类居民的租金—距离关系曲线

Fig. 2 Rent-distance curves for two types of residents under pattern ‘NC + C’

居民居住分布模式(II) 根据定义 2, 在 ‘NC + C + NC’ 模式下, 所有的无车居民居住在 CBD 附近以及城市边界附近, 而有车用户住在中部地区, 如图 3 所示. 在均衡状态, 满足以下条件

$$R_c(x_1, u_c) = R_{nc}(x_1, u_{nc}) \quad (25)$$

$$R_c(x_2, u_c) = R_{nc}(x_2, u_{nc}) \quad (26)$$

$$R_{nc}(B, u_{nc}) = r_a \quad (27)$$

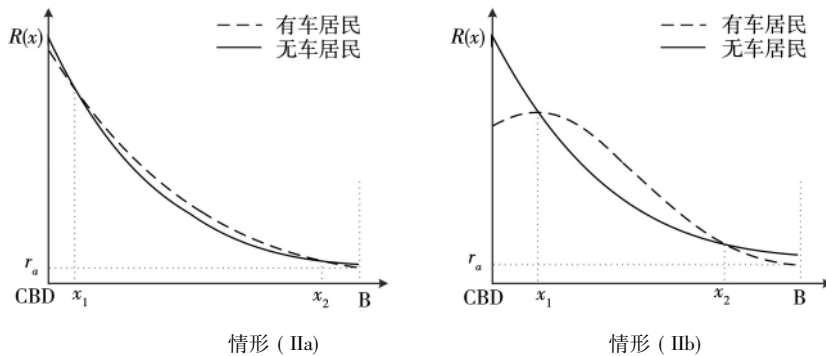


图 3 ‘NC + C + NC’ 模式下两类居民的租金—距离关系曲线

Fig. 3 Rent-distance curves for two types of residents under pattern ‘NC + C + NC’

$$\int_0^{x_0} 1/q_{nc}(x, u_{nc}) dx = N_{nc} \quad (23)$$

$$\int_{x_0}^B 1/q_c(x, u_c) dx = N_c \quad (24)$$

其中 B 是内生的城市边界, r_a 是外生给定的农业租金价格, x_0 是两类居民的居住分离点, N_c 和 N_{nc} 分别是有车居民和无车居民的数量. 式 (21) 表示在 x_0 处两类居民愿意支付的住房租金价格是相同的, 式 (22) 表明在城市边界处有车居民愿意支付的住房租金价格等于农业租金价格, 式 (23) 和式 (24) 是人口守恒条件, 表明所有的无车居民居住在 CBD 和区位 x 之间, 而有车居民居住在区位 x 和城市边界 B 之间.

$$\int_0^{x_1} 1/q_{nc}(x, u_{nc}) dx + \int_{x_2}^B 1/q_2(x, u_{nc}) dx = N_{nc} \quad (28)$$

$$\int_{x_1}^{x_2} 1/q_c(x, u_c) dx = N_c \quad (29)$$

其中 x_1 和 x_2 为两类居民的居住分离点. 式 (25) ~ 式 (27) 是土地市场均衡条件, 式 (28) 和式 (29) 是人口守恒条件.

3 比较静态分析

本节探讨小汽车保有量的增加对城市空间结构以及两类居民效用水平的影响,以及城市居民数量对城市系统的影响。

3.1 小汽车保有量的影响

性质 4 在一个封闭的单中心城市,当城市居民分布服从‘NC + C’模式时,小汽车保有量的增加导致:(a) 两类居民的居住分离点更靠近 CBD,(b) 城市边界增大,(c) 有车居民的效用水平降低,(d) 无车居民的效用水平提高。

证明 给定城市总人数 N ,式(21) ~ 式(24) 对 N_c 求导得

$$\frac{dR_c}{dx_0} \frac{dx_0}{dN_c} + \frac{dR_c}{du_c} \frac{du_c}{dN_c} - \frac{dR_{nc}}{dx_0} \frac{dx_0}{dN_c} - \frac{dR_{nc}}{du_{nc}} \frac{du_{nc}}{dN_c} = 0$$

$$\frac{dR_c}{dx} \Big|_{x=B} \frac{dB}{dN_c} + \frac{dR_c}{du_c} \frac{du_c}{dN_c} = 0$$

$$\frac{1}{q_{nc}(x_0)} \frac{dx_0}{dN_c} - \frac{du_{nc}}{dN_c} \int_0^{x_0} \frac{1}{q_c^2} \frac{\partial q_{nc}}{\partial u_{nc}} dx = -1$$

$$\frac{1}{q_c(B)} \frac{dB}{dN_c} - \frac{1}{q_{nc}(x_0)} \frac{dx_0}{dN_c} - \frac{du_c}{dN_c} \int_{x_0}^B \frac{1}{q_c^2} \frac{\partial q_c}{\partial u_c} dx = 1$$

通过求解以上方程,可推导出:

- (a) $\frac{dx_0}{dN_c} < 0$; (b) $\frac{dB}{dN_c} > 0$; (c) $\frac{du_c}{dN_c} < 0$;
- (d) $\frac{du_{nc}}{dN_c} > 0$. 证毕。

性质 4 表明,当居民分布服从‘NC + C’时,小汽车保有量的增加,也就是说无车居民减少,导致无车居民的居住区域更紧凑。但是无车居民的效用水平提高,这是因为每个无车居民可以消费更多的住房面积并且住房租金也降低。另一方面,有车居民的居住区域增大,因此有车居民的出行成本增加,从而他们的可支配收入减少,导致消费

更少的住房面积,因此有车居民效用水平降低。

性质 5 在一个封闭的单中心城市,当城市居民分布服从‘NC + C + NC’模式时,小汽车保有量的增加导致:(a) 城市边界减小,(b) CBD 附近的居住分离点更靠近 CBD,(c) 城市边界附近的居住分离点更靠近城市边界,(d) 无车居民的效用水平提高,(e) 有车居民的效用水平变化不确定。

证明 给定城市总人数 N ,式(25) ~ 式(29) 对 N_c 求导得

$$\frac{dR_{nc}}{dx_1} \frac{dx_1}{dN_c} + \frac{dR_{nc}}{du_{nc}} \frac{du_{nc}}{dN_c} - \frac{dR_c}{dx_1} \frac{dx_1}{dN_c} - \frac{dR_c}{du_c} \frac{du_c}{dN_c} = 0$$

$$\frac{dR_{nc}}{dx_2} \frac{dx_2}{dN_c} + \frac{dR_{nc}}{du_{nc}} \frac{du_{nc}}{dN_c} - \frac{dR_c}{dx_2} \frac{dx_2}{dN_c} - \frac{dR_c}{du_c} \frac{du_c}{dN_c} = 0$$

$$\frac{dR_{nc}}{dx} \Big|_{x=B} \frac{dB}{dN_c} + \frac{dR_{nc}}{du_{nc}} \frac{du_{nc}}{dN_c} = 0$$

$$\frac{1}{q_{nc}(x_1)} \frac{dx_1}{dN_c} - \frac{du_{nc}}{dN_c} \int_0^{x_1} \frac{1}{q_c^2} \frac{\partial q_{nc}}{\partial u_{nc}} dx + \frac{1}{q_{nc}(B)} \frac{dB}{dN_c} - \frac{1}{q_{nc}(x_2)} \frac{dx_2}{dN_c} - \frac{du_{nc}}{dN_c} \int_{x_2}^B \frac{1}{q_c^2} \frac{\partial q_c}{\partial u_c} dx = -1$$

$$\frac{1}{q_c(x_2)} \frac{dx_2}{dN_c} - \frac{1}{q_{nc}(x_2)} \frac{dx_2}{dN_c} - \frac{du_c}{dN_c} \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{q_c^2} \frac{\partial q_c}{\partial u_c} dx = 1$$

求解以上方程,可得

- (a) $\frac{dB}{dN_c} < 0$; (b) $\frac{dx_1}{dN_c} < 0$; (c) $\frac{dx_2}{dN_c} > 0$;
- (d) $\frac{du_{nc}}{dN_c} > 0$; (e) $\frac{du_c}{dN_c}$ 的符号不确定。 证毕。

性质 5 表明小汽车保有量的增加导致城市边界收缩,而且,有车居民的效用水平有可能增加。表 1 汇总了小汽车保有量的增加对城市系统的影响。可以看到,小汽车的增加并不一定会导致城市的扩张。而且,随着小汽车保有量的增加,无车居民的效用水平总是提高的而有车居民的效用水平有可能降低。这表明随着小汽车保有量的增加,有车居民有可能受损而无车居民获益。

表 1 小汽车保有量增加产生的影响
Table 1 Effects of increasing car ownership

变量	因变量	分布模式 I	分布模式 II
小汽车保有量增加	居住分离点	减小	减小 (CBD 附近的) 增大 (城市边界附近的)
	城市边界	增加	减小
	无车居民的效用水平	提高	提高
	有车居民的效用水平	降低	不确定

3.2 城市人口的影响

本节主要分析城市居民数量对城市系统的影响,且假定城市中有车居民和无车居民的比例不变,用 σ 表示,那么 $N_{nc} = \sigma N_{nc}^0$, $N_c = \sigma N_c^0$, 其中, N_{nc}^0 和 N_c^0 分别表示无车居民数量和有车居民数量的基准值. 那么,探讨城市居民数量的影响,即探讨 σ 的影响.

性质 6 在一个封闭的单中心城市,当城市居民分布服从 ‘NC + C’ 模式时,城市居民数量的增加导致: (a) 两类居民的居住分离点更远离 CBD, (b) 城市边界增大, (c) 有车居民的效用水平降低, (d) 无车居民的效用水平降低.

证明 式(21) ~ 式(24) 对 σ 求导得

$$\frac{dR_c}{dx_0} \frac{dx_0}{d\sigma} + \frac{dR_c}{du_c} \frac{du_c}{d\sigma} - \frac{dR_{nc}}{dx_0} \frac{dx_0}{d\sigma} - \frac{dR_{nc}}{du_{nc}} \frac{du_{nc}}{d\sigma} = 0$$

$$\left. \frac{dR_c}{dx} \right|_{x=B} \frac{dB}{d\sigma} + \frac{dR_c}{du_c} \frac{du_c}{d\sigma} = 0$$

$$\frac{1}{q_{nc}(x_0)} \frac{dx_0}{d\sigma} - \frac{du_{nc}}{d\sigma} \int_0^{x_0} \frac{1}{q_{nc}^2} \frac{\partial q_{nc}}{\partial u_{nc}} dx = N_{nc}^0$$

$$\frac{1}{q_c(B)} \frac{dB}{d\sigma} - \frac{1}{q_{nc}(x_0)} \frac{dx_0}{d\sigma} - \frac{du_c}{d\sigma} \int_{x_0}^B \frac{1}{q_c^2} \frac{\partial q_c}{\partial u_c} dx = N_c^0$$

求解以上方程可得

$$(a) \frac{dx_0}{d\sigma} > 0; (b) \frac{dB}{d\sigma} > 0; (c) \frac{du_c}{d\sigma} < 0; (d)$$

$$\frac{du_{nc}}{d\sigma} < 0.$$

证毕.

性质 7 在一个封闭的单中心城市,当城市居

民分布服从 ‘NC + C + NC’ 模式时,城市居民数量的增加导致: (a) 城市边界增加, (b) CBD 附近的居住分离点更靠近 CBD, (c) 城市边界附近的居住分离点更靠近城市边界, (d) 无车居民的效用水平降低, (e) 有车居民的效用水平降低.

证明 式(25) ~ 式(29) 对 σ 求导得

$$\frac{dR_{nc}}{dx_1} \frac{dx_1}{d\sigma} + \frac{dR_{nc}}{du_{nc}} \frac{du_{nc}}{d\sigma} - \frac{dR_c}{dx_1} \frac{dx_1}{d\sigma} - \frac{dR_c}{du_c} \frac{du_c}{d\sigma} = 0$$

$$\frac{dR_{nc}}{dx_2} \frac{dx_2}{d\sigma} + \frac{dR_{nc}}{du_{nc}} \frac{du_{nc}}{d\sigma} - \frac{dR_c}{dx_2} \frac{dx_2}{d\sigma} - \frac{dR_c}{du_c} \frac{du_c}{d\sigma} = 0$$

$$\left. \frac{dR_{nc}}{dx} \right|_{x=B} \frac{dB}{d\sigma} + \frac{dR_{nc}}{du_{nc}} \frac{du_{nc}}{d\sigma} = 0$$

$$\frac{1}{q_{nc}(x_1)} \frac{dx_1}{d\sigma} - \frac{du_{nc}}{d\sigma} \int_0^{x_1} \frac{1}{q_{nc}^2} \frac{\partial q_{nc}}{\partial u_{nc}} dx + \frac{1}{q_{nc}(B)} \frac{dB}{d\sigma} -$$

$$\frac{1}{q_{nc}(x_2)} \frac{dx_2}{d\sigma} - \frac{du_{nc}}{d\sigma} \int_{x_2}^B \frac{1}{q_c^2} \frac{\partial q_c}{\partial u_c} dx = N_{nc}^0$$

$$\frac{1}{q_c(x_2)} \frac{dx_2}{d\sigma} - \frac{1}{q_{nc}(x_2)} \frac{dx_2}{d\sigma} - \frac{du_c}{d\sigma} \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{q_c^2} \frac{\partial q_c}{\partial u_c} dx = N_c^0$$

求解以上方程可得

$$(a) \frac{dB}{d\sigma} > 0; (b) \frac{dx_1}{d\sigma} < 0; (c) \frac{dx_2}{d\sigma} > 0;$$

$$(d) \frac{du_{nc}}{d\sigma} < 0; (e) \frac{du_c}{d\sigma} < 0. \quad \text{证毕.}$$

表 2 汇总了城市居民数量的增加对城市系统的影响. 明显地,城市居民数量的增加一定会导致城市的扩张. 而且,随着城市居民数量的增加,无车居民和有车居民的效用水平总是降低.

表 2 城市居民数量增加产生的影响

Table 2 Effects of increasing residential population

变量	因变量	分布模式 I	分布模式 II
城市居民数量增加	居住分离点	增加	减小 (CBD 附近的)
			增大 (城市边界附近的)
	城市边界	增加	增加
	无车居民的效用水平	降低	降低
	有车居民的效用水平	降低	降低

4 数值实验

为了更好地展示论文的贡献,本节利用数值算例进一步研究模型的具体应用. 第一个模拟算

例情景可以表明自驾出行的偏好对城市系统(住房租金价格和住房消费量)的影响,第二个算例情景是探讨小汽车保有量和城市居民数量的变化对整个城市系统的影响. 表 3 给出了算例中参数的基准值.

表3 算例中输入的参数

Table 3 Inputted parameters in numerical examples

参数	说明	基准值
N_c	有车居民的数量	10 000 (变化前), 15 000 (变化后)
N_{nc}	无车居民的数量	20 000 (变化前), 15 000 (变化后)
Y_c	有车居民的年工资/RMB	8.0×10^4
Y_{nc}	无车居民的年工资/RMB	6.0×10^4
r_a	农业租金价格/RMB /km ²	3.0×10^4
α, β	效用方程中的参数	0.75, 0.25
f_1	自驾车单程的固定成本/RMB	10
f_2	公共交通单程的固定成本/RMB	6
t_{c1}	自驾车每单位距离的边际成本/RMB /km	$\frac{24}{75}$ (情形 a) 或 $\frac{24}{90}$ (情形 b)
t_{c2}	有车居民使用公交每单位距离的边际成本/RMB /km	$\frac{24}{70}$
t_{nc2}	无车居民使用公交每单位距离的边际成本/RMB /km	$\frac{18}{70}$
F	分摊的购买小汽车的固定成本/RMB	10 000 (模式 I) 或 25 000 (模式 II)
φ	通勤天数	300
θ	Logit 方程中的参数	0.05

注: 情形 (a), 即租金价格随离 CBD 的距离的增加而降低; 情形 (b), 即租金价格随离 CBD 的距离的增加先提高后降低; 模式 I, 即居民居住分布模式 ‘NC + C’; 模式 II, 即居民居住分布模式 ‘NC + C + NC’.

4.1 城市居民全为有车居民的情形

首先在一个特殊的情形即所有的居民均为有车居民时, 研究了自驾出行的偏好对住房租金价格以及住房消费量的影响.

图 4 和图 5 给出了不同情形下均衡时的住房租金价格和住房消费在空间上的变化情况. 在情形 (a) 中, $t_{c1} = 24/75$, 满足条件

$$1 - \frac{\varphi}{\theta(Y_c - \varphi C_c(0) - F)} \leq \frac{t_{c1}}{t_{c2}}. \text{ 显然, 住房租金}$$

价格是单调递减的, 而住房消费面积是单调递增的.

在情形 (b) 中, $t_{c1} = 24/90$, 满足条件 $1 - \frac{\varphi}{\theta(Y_c - \varphi C_c(0) - F)} > \frac{t_{c1}}{t_{c2}}$ 发现随着距离 CBD 越远, 住房租金价格先增加后降低, 与性质 2 一致. 而且, 随着距离 CBD 越远, 住房消费面积呈相反的趋势, 即先减小后增大. 在这种情形下, 由于有车居民对自驾车的偏好导致正向的租金 - 距离关系.

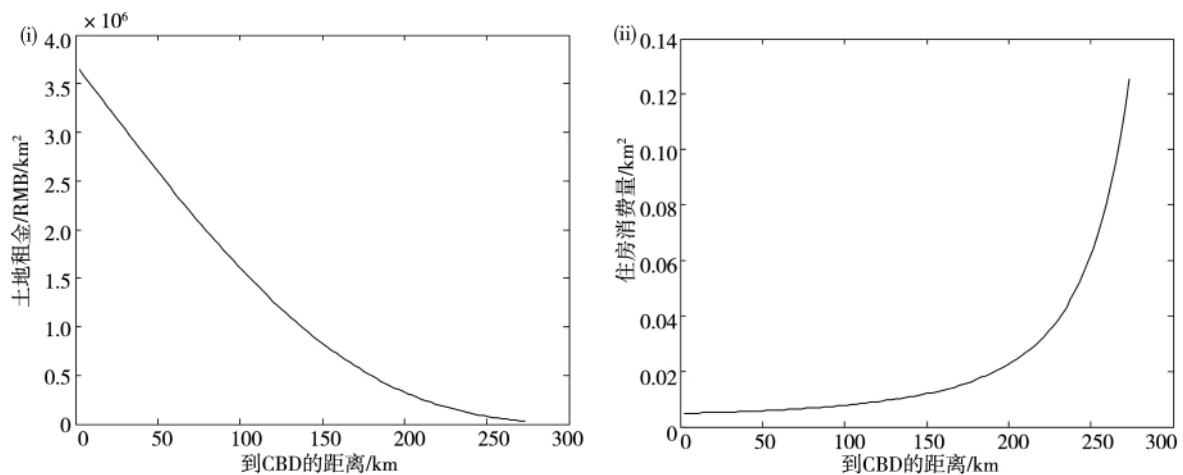


图 4 情形 (a) 下土地租金价格和住房消费的变化

Fig. 4 Changes of land rent and residential consumption in case (a)

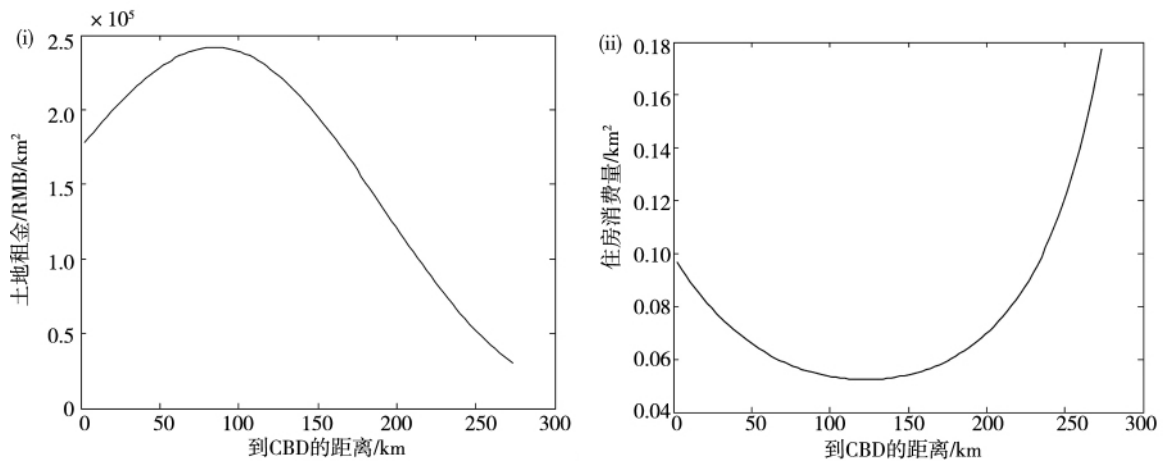


图 5 情形 (b) 下土地租金价格和住房消费的变化

Fig. 5 Changes of land rent and residential consumption in case (b)

4.2 城市中既有有车居民又有无车居民的情形

接下来,用算例展现在一个含有两类居民的城市系统中,居民的居住分布以及小汽车保有量和城市居民数量变化带来的影响.

4.2.1 小汽车保有量增加的影响

1) 模式 ‘NC + C’

图 6 和图 7 展示了住房租金价格和住房消费量在小汽车保有量增加前后的变化情况. 其中细线表示小汽车保有量增加前,粗线表示小汽车保有量增加后. 一个显而易见的结果是,随着小汽车

保有量的增加,城市边界扩大,与土地租金价格的变化趋势无关. 还可以发现,有车居民的居住区域扩大. 然而,由于有车居民之间的竞争,土地竞租价格上升,住房消费量下降. 因此,有车居民的效用水平从 378. 15 下降到 369. 20(情形 (a)), 以及从 547. 45 下降到 517. 66(情形 (b)), 参见表 4. 对于无车居民而言,土地租金价格的下降以及住房消费量的增加使得他们的效用水平从 692. 95 提高到 696. 75(情形 (a)), 以及从 717. 04 提高到 740. 78(情形 (b)).

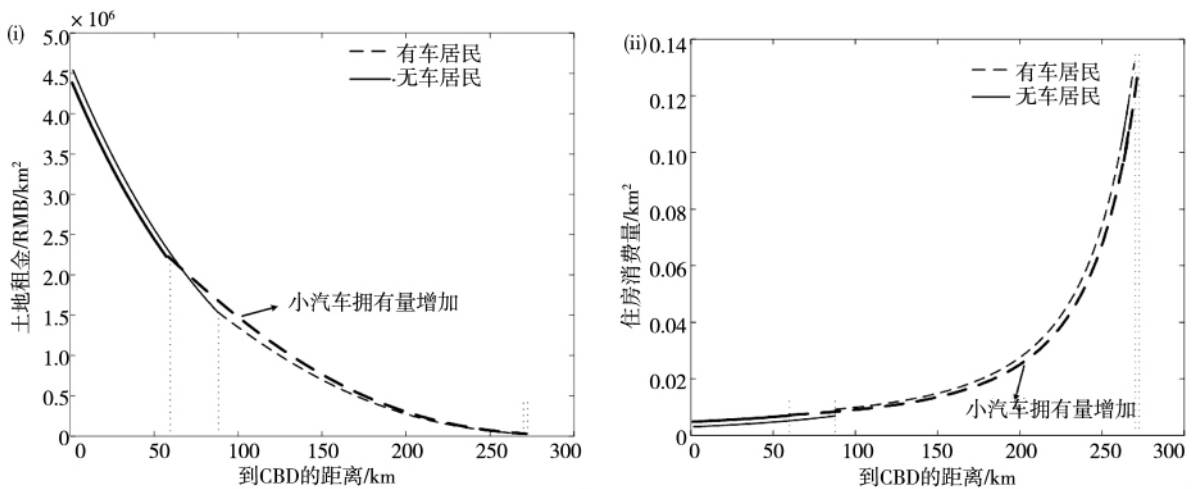


图 6 模式 ‘NC + C’ 之情形 (a) 下小汽车保有量增加前后土地租金价格和住房消费量的变化

Fig. 6 Changes of land rent and residential consumption before and after increasing car ownership in case (a) of pattern ‘NC + C’

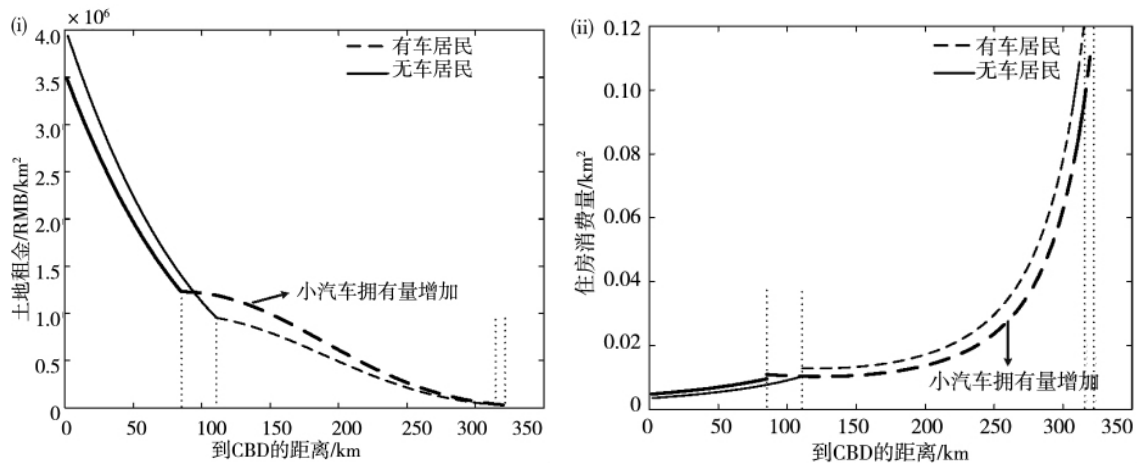


图7 模式‘NC + C’之情形(b)下小汽车保有量增加前后土地租金价格和住房消费量的变化

Fig. 6 Changes of land rent and residential consumption before and after increasing car ownership in case (b) of pattern ‘NC + C’

表4 小汽车保有量增加前后城市系统的变化(模式‘NC + C’)

Table 4 Changes of urban system before and after increasing car ownership for pattern ‘NC + C’

均衡解	情形(a)		情形(b)	
	前	后	前	后
居住分离点/km	87.80	59.88	110.86	85.00
城市边界/km	269.68	271.72	315.05	320.15
无车居民的效用水平	692.95	696.75	717.04	740.78
有车居民的效用水平	378.15	369.20	547.45	517.66

2) 模式‘NC + C + NC’

设定分摊的购买汽车的固定成本 $F = 25\ 000$ (RMB), 此时, 有车居民选择居住在城市的中部地区. 图8和图9展示了小汽车保有量增加前后土地租金价格和住房消费量的变化情况. 表5给出了不同情形下的均衡解. 与小汽车保有量增加前相比, 小汽车保有量的增加导致城市边界收缩, 与土地租金价格随通勤距离的变化趋势无关. 这一结果不同于在居民分布服从模式I时的结果. 而且, 有车居民的居住区域增大, 也就是说 CBD附近的居住分离点减小而城市边界附近的居住分离点增大.

从图8和图9还可以看出, 无车居民的住房消费量增大, 因此他们的效用水平提高, 情形(a)

下从697.01提高到711.60, 情形(b)下从711.60提高到730.28. 然而, 有车居民的住房消费量变化是不确定的. 在情形(a)中, 有车居民的住房消费量增加, 他们的效用水平从272.51提高到272.88(见表5), 而在情形(b)中, 有车居民的住房消费量降低, 效用水平由371.40降低到361.30.

4.2.2 城市居民数量增加的影响

本节将探讨城市居民数量对城市系统的影响. 根据4.2节中的假设, 城市居民总数量发生改变, 但城市中有车居民和无车居民的比例不变. 因此, 在本小节的算例中, $N_{nc}^0 = 15\ 000$ 和 $N_c^0 = 15\ 000$ 分别为无车居民和有车居民数量的基准值, $N_{nc}^0 = 20\ 000$ 和 $N_c^0 = 20\ 000$ 分别为城市居民数量增加后无车居民和有车居民的数量.

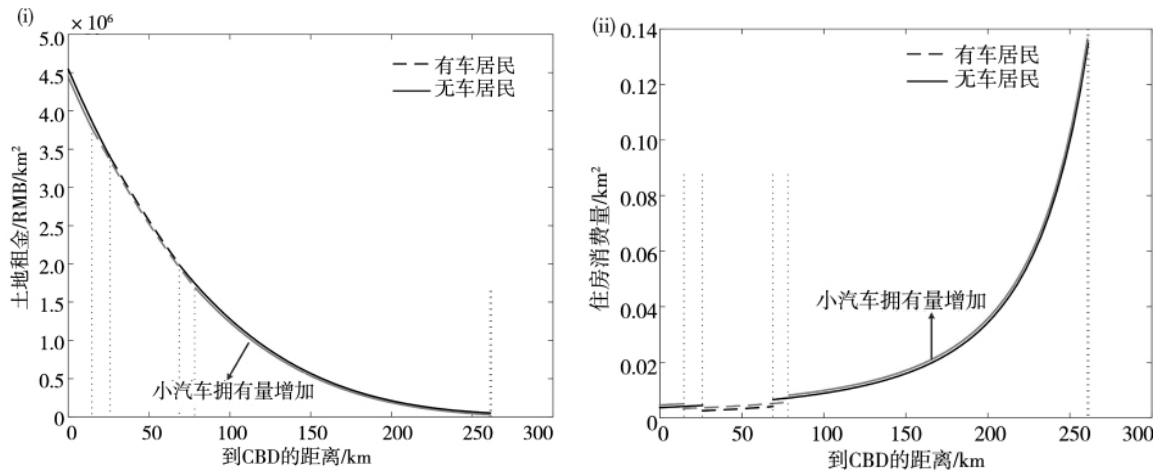


图 8 模式 ‘NC + C + NC’ 之情形 (a) 下小汽车保有量增加前后土地租金价格和住房消费量的变化

Fig. 8 Changes of land rent and residential consumption before and after increasing car ownership in case (a) of pattern ‘NC + C + NC’

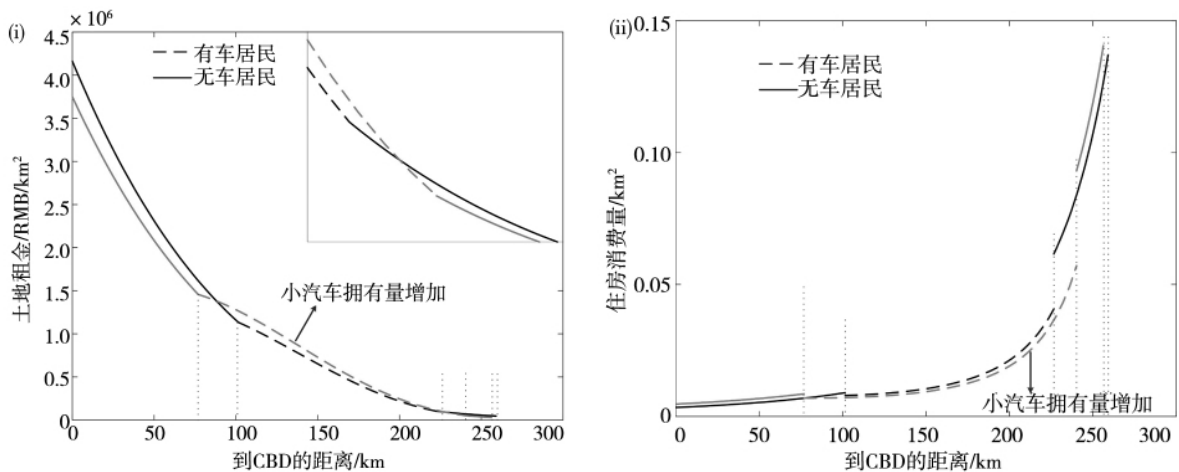


图 9 模式 ‘NC + C + NC’ 之情形 (b) 下小汽车保有量增加前后土地租金价格和住房消费量的变化

Fig. 9 Changes of land rent and residential consumption before and after increasing car ownership in case (b) of pattern ‘NC + C + NC’

表 5 小汽车保有量增加前后城市系统的变化(模式 ‘NC + C + NC’)

Table 5 Changes of urban system before and after increasing car ownership for pattern ‘NC + C + NC’

均衡解	情形 (a)		情形 (b)	
	前	后	前	后
CBD 附近的居住分离点/km	26.05	14.42	101.49	76.91
城市边界附近的居住分离点/km	69.01	78.70	226.53	240.17
城市边界/km	261.23	260.75	259.04	256.23
无车居民的效用水平	697.01	700.15	711.60	730.38
有车居民的效用水平	272.51	272.88	371.40	361.30

1) 模式 ‘NC + C’

表 6 给出了情形 (a) 和情形 (b) 下, 当居民居住分布模式服从 ‘NC + C’ 时城市系统的均衡解. 我们可以发现, 城市居民数量增加后, 居住分离点

和城市边界均扩张. 然而城市居民, 无论是有车居民还是无车居民, 他们的效用水平均下降. 这是因为城市居民数量增加后, 土地租金增加, 住房消费量减少(参见图 10 和图 11).

表6 城市居民数量增加前后城市系统的变化(模式‘NC+C’)

Table 6 Changes of urban system before and after increasing residential population for pattern ‘NC + C’

均衡解	情形 (a)		情形 (b)	
	15 000/15 000	20 000/20 000	15 000/15 000	20 000/20 000
居住分离点/km	59.88	59.99	85.00	85.11
城市边界/km	271.72	277.49	320.15	326.17
无车居民的效用水平	696.75	648.60	740.78	689.53
有车居民的效用水平	369.20	343.73	517.66	482.04

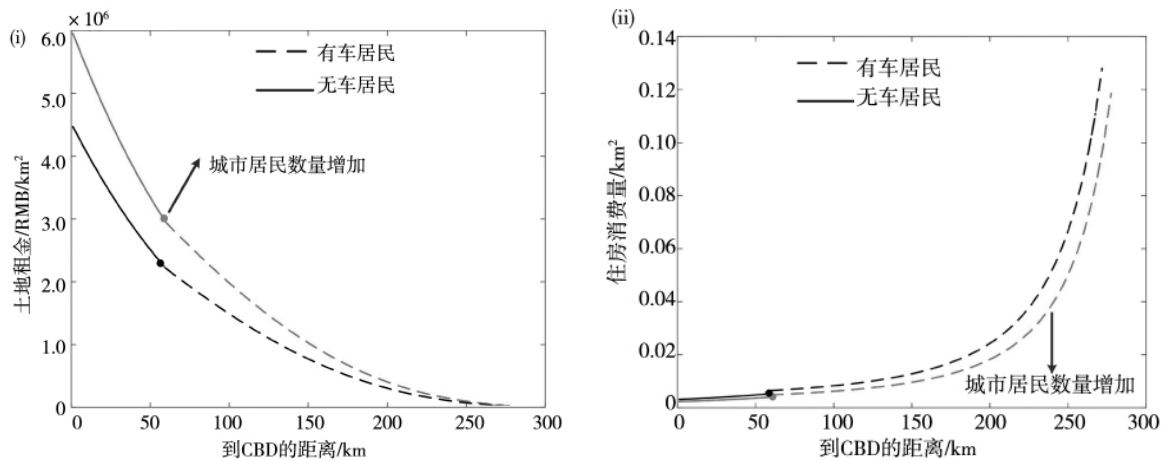


图10 模式‘NC+C’之情形(a)下城市居民数量增加前后土地租金价格和住房消费量的变化

Fig. 10 Changes of land rent and residential consumption before and after increasing residential population in case (a) of pattern ‘NC + C’

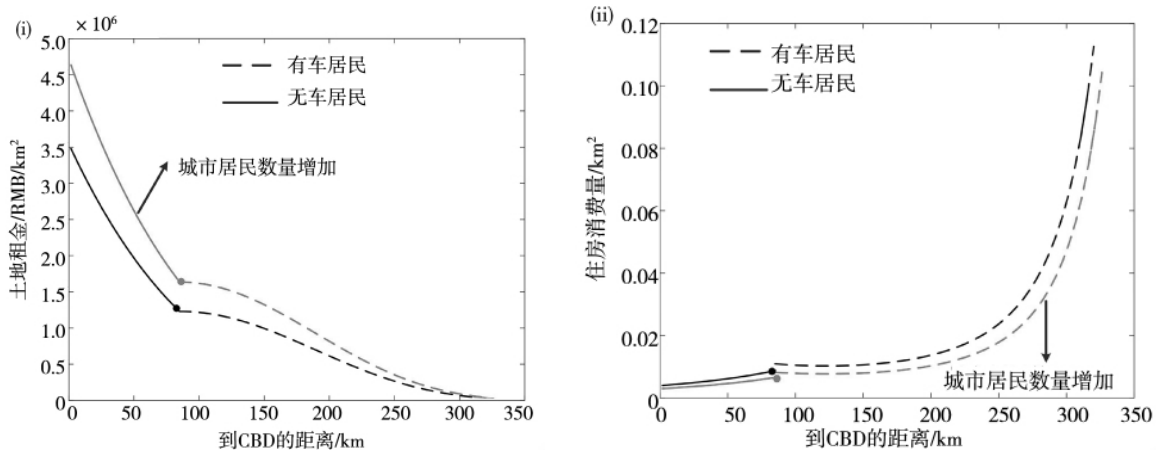


图11 模式‘NC+C’之情形(b)下城市居民数量增加前后土地租金价格和住房消费量的变化

Fig. 11 Changes of land rent and residential consumption before and after increasing residential population in case (b) of pattern ‘NC + C’

2) 模式‘NC + C + NC’

表7给出了情形(a)和情形(b)下,当居民居住分布模式服从‘NC + C + NC’时城市系统的均衡解.显然,随着城市居民数量的增加,CBD附近的居住分离点减小,而城市边界附近的居住分离

点和城市边界增加.这表明有车居民的居住范围扩张,同时,无车居民的居住范围也扩张.然而,有车居民和无车居民的效用水平均降低,这是因为随着城市居民数量的增加,土地租金增加,住房消费量减少(参见图12和图13).

表 7 城市居民数量增加前后城市系统的变化(模式‘NC + C + NC’)

Table 7 Changes of urban system before and after increasing residential population for pattern ‘NC + C + NC’

均衡解	情形 (a)		情形 (b)	
	15 000/15 000	20 000/20 000	15 000/15 000	20 000/20 000
CBD 附近的居住分离点/km	14.42	14.36	76.91	76.80
城市边界附近的居住分离点/km	78.70	78.74	240.17	240.23
城市边界/km	260.75	267.99	256.23	263.76
无车居民的效用水平	700.15	651.84	730.38	680.07
有车居民的效用水平	272.88	254.05	361.30	336.33

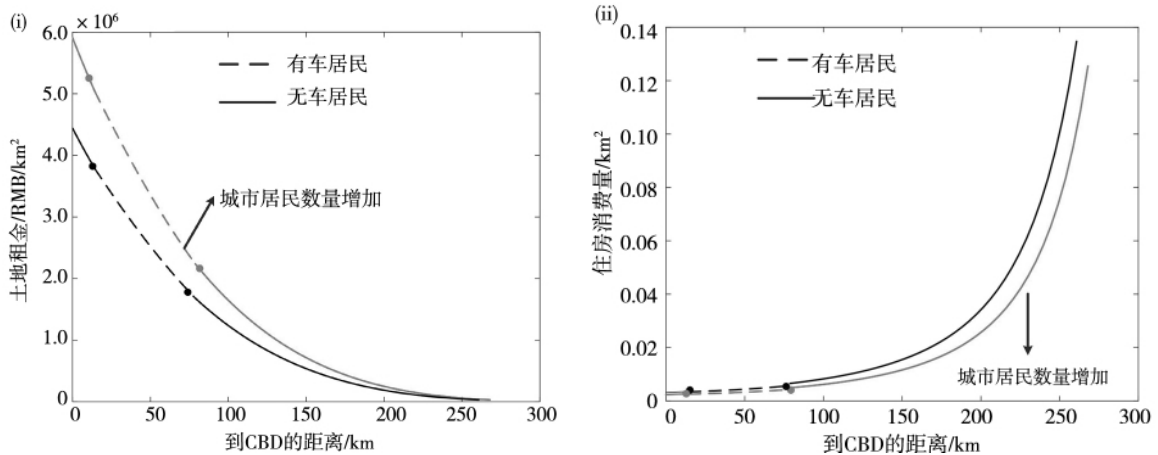


图 12 模式‘NC + C + NC’之情形(a)下城市居民数量增加前后土地租金价格和住房消费量的变化

Fig. 12 Changes of land rent and residential consumption before and after increasing residential population in case (a) of pattern ‘NC + C + NC’

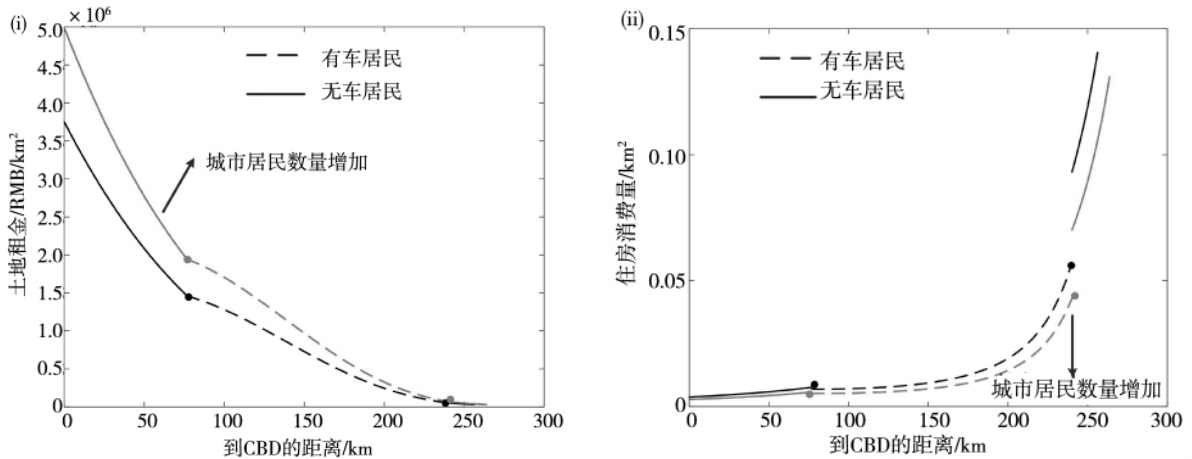


图 13 模式‘NC + C + NC’之情形(b)下城市居民数量增加前后土地租金价格和住房消费量的变化

Fig. 13 Changes of land rent and residential consumption before and after increasing residential population in case (b) of pattern ‘NC + C + NC’

5 结束语

本文扩展了经典的线性单中心城市模型,研究了自驾出行偏好、小汽车保有量以及城市居民

数量的变化对城市空间结构的影响. 不同于已有模型中居民的出行行为是完全理性的假设,在本文的模型中,对于有车居民而言,他们的出行方式选择服从 Logit 形式,选择自驾车出行的概率(即自驾车偏好)直接影响其效用水平. 该模型提出了

一些新的见解. 首先,有车居民对自驾出行的偏好使得住房租金价格可能随通勤距离的增加先增加后减小. 其次,考虑到有车居民自驾车的偏好,无车居民的居住区位距离 CBD 将会更近. 第三,小汽车保有量的增加并不一定导致城市的扩张,它取决于有车和无车居民的人口分布模式. 如果一部分无车居民居住在城市边界附近,那么总人口不变前提下有车居民的比例增加反而使得城市收缩. 而且,小汽车保有量的增加并不一定会提高有车居民的效用水平. 第四,城市居民数量的增加导致城市扩张,但城市居民效用水平降低.

本文提出的模型为探讨城市交通系统、土地利用以及小汽车拥有之间的交互关系提供了理论支持,但仍存在改进的空间. 首先,本文没有考虑交通出行的拥挤成本,而现实中交通拥堵是高峰

期通勤的一个重要特征,也是影响人们通勤出行方式选择的重要因素,因此在未来的研究中可以考虑城市交通拥挤的外部性,刻画更为符合现实情况的出行成本函数进行模型扩展^[21-23]. 其次,本文是基于线性单中心城市结构构建的模型,而现实中城市结构不单单是线性结构,未来可考虑其他类型(二维城市、放射状城市等). 同时,现代城市一般有多多个商业中心,进一步的研究可以探讨多中心城市结构. 第三,本文假设拥有小汽车居民的数量是外生给定的,而实际上居民购买小汽车的行为是受其职住位置、城市车牌管理政策^[24]等因素影响的,因此有必要研究居民购买小汽车的决策行为,从而内生小汽车保有量来探讨城市居民出行选择和住宅选址行为之间的内生关系.

参 考 文 献:

- [1] http://www.nx.xinhuanet.com/2017-01/11/c_1120288453.htm.
- [2] Ding C, Wang D G, Liu C, et al. Exploring the influence of built environment on travel mode choice considering the mediating effects of car ownership and travel distance [J]. *Transportation Research Part A*, 2017, 100: 65-80.
- [3] Zhou M, Wang D G. Generational differences in attitudes towards car, car ownership and car use in Beijing [J]. *Transportation Research Part D*, 2019, 72: 261-278.
- [4] Kitamura R. A causal analysis of car ownership and transit use [J]. *Transportation*, 1989, 16: 155-173.
- [5] Chiou Y C, Wen C H, Tsai S H, et al. Integrated modeling of car/motorcycle ownership, type and usage for estimating energy consumption and emissions [J]. *Transportation Research Part A*, 2009, 43: 665-684.
- [6] Alonso W. *Location and Land Use: Toward a General Theory of Land Rent* [M]. Cambridge: Harvard University Press, 1964.
- [7] Muth R F. *Cities and Housing* [M]. Chicago: University of Chicago Press, 1969.
- [8] Mills E S. *Urban Economics* [M]. Glenview: ScottForesman, 1972.
- [9] 丁成日. 城市空间结构理论——单中心城市静态模型 [J]. *城市发展研究*, 2006, 4: 121-126.
Ding Chengri. Urban spatial theory: Static monocentric model [J]. *Urban Studies*, 2006, 4: 121-126. (in Chinese)
- [10] 于璐, 郑思齐, 刘洪玉. 住房价格梯度的空间互异性及影响因素——对北京城市空间结构的实证研究 [J]. *经济地理*, 2008, 3: 406-410.
Yu Lu, Zheng Siqu, Liu Hongyu. The spatial variation and affecting factors of the housing price gradients: The case of Beijing [J]. *Economic Geography*, 2008, 3: 406-410. (in Chinese)
- [11] Richardson H W. On the possibility of positive rent gradients [J]. *Journal of Urban Economics*, 1977, 4: 60-68.
- [12] Yiu C Y, Tam C S. A review of recent empirical studies on property price gradients [J]. *Journal of Real Estate Literature*, 2004, 12 (3): 307-322.
- [13] Takahashi T. Determination of neighbourhood housing amenities: Asymmetric effects of consumers' choices and multiple equilibria [J]. *Papers in Regional Science*, 2017, 96 (3): 555-570.
- [14] Brueckner R. Transport subsidies, system choice, and urban sprawl [J]. *Regional Science and Urban Economics*, 2005, 35 (6): 715-733.
- [15] Chen Y J, Li Z C, Lam W H K, et al. Tradable location tax credit scheme for balancing traffic congestion and environmental externalities [J]. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2016, 10 (10): 917-934.

- [16] 田琼, 黄海军, 杨海. 瓶颈处停车换乘的 Logit 随机均衡模型 [J]. 管理科学学报, 2005, 8(1): 1-6.
Tian Qiong, Huang Haijun, Yang Hai. Mode choice models based on Logit stochastic equilibrium in transportation systems with park-and-ride option [J]. Journal of Management Sciences in China, 2005, 8(1): 1-6. (in Chinese)
- [17] 卢晓珊, 黄海军, 刘天亮, 等. 考虑早晚高峰出行链的出行方式选择均衡与定价机制 [J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(1): 167-174.
Lu Xiaoshan, Huang Haijun, Liu Tianliang, et al. Mode choice equilibrium and pricing mechanisms considering peak trip chain [J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2013, 33(1): 167-174. (in Chinese)
- [18] Sasaki K. Income class, modal choice, and urban spatial structure [J]. Journal of Urban Economics, 1990, 27(3): 322-343.
- [19] Li Z C, Peng Y T. Modeling the effects of vehicle emission taxes on residential location choices of different-income households [J]. Transportation Research Part D, 2016, 48: 248-266.
- [20] Tabuchi T. Do the rich and poor colocate in large cities? [J]. Journal of Urban Economics, 2019, 113: 103186.
- [21] Liu T L, Huang H J, Yang H, et al. Continuum modeling of park-and-ride services in a linear monocentric city with deterministic mode choice [J]. Transportation Research Part B, 2009, 43: 692-707.
- [22] Xu S X, Liu T L, Huang H J, et al. Mode choice and railway subsidy in a congested monocentric city with endogenous population distribution [J]. Transportation Research Part A, 2018, 116: 413-433.
- [23] 周鲜成, 刘长石, 周开军, 等. 时间依赖型绿色车辆路径模型及改进蚁群算法 [J]. 管理科学学报, 2019, 22(5): 57-67.
Zhou Xiancheng, Liu Changshi, Zhou Kaijun, et al. Improved ant colony algorithm and modelling of time-dependent green vehicle routing problem [J]. Journal of Management Sciences in China, 2019, 22(5): 57-67. (in Chinese)
- [24] 冯苏苇, 林昌. 车牌额度拍卖市场管制有效性及效率改进空间 [J]. 管理科学学报, 2018, 21(9): 12-22.
Feng Suwei, Lin Chang. Performance evaluation of car ownership regulation on Shanghai quota auction market and its improvement [J]. Journal of Management Sciences in China, 2018, 21(9): 12-22. (in Chinese)

Preference for auto driving, resident heterogeneity and residential location choice: Urban spatial equilibrium analysis based on the monocentric city model

XU Shu-xian^{1,2}, LIU Tian-liang², HUANG Hai-jun², LIU Rong-hui³

1. College of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. MoE Key Laboratory of Complex System Analysis and Management Decision, School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China;
3. Institute for Transport Studies, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK

Abstract: Based on the monocentric city model, this paper investigates the urban spatial equilibrium in a bi-modal traffic corridor with car-owning and non-car-owning residents. By explicitly integrating the preference for auto driving into car-owning residents' direct utility functions, the paper presents a new city model and analyzes the impact of the preference for auto driving on urban land rental price. It is shown that when all residents are car-owning residents, the value of residential land first increases and then decreases as the residential location is further away from the CBD. Two possible urban spatial patterns are explored when the different travel behaviors between car-owning and no-car-owning residents are considered. Based on the presented model, the effects of car ownership and total residents change on urban spatial structure and utility level are further analyzed.

Key words: monocentric city model; urban spatial equilibrium; household residential choice; car ownership