

北京大学林肯研究院城市发展与土地政策研究中心课题研究报告

低碳视角下职住地建成环境对通勤方式选择的影响机制研究

单 位 北京航空航天大学
课 题 负 责 人 丁 川
起 止 时 间 2016 年 11 月 - 2017 年 8 月

2017 年 7 月

低碳视角下职住地建成环境对通勤方式选择的影响机制研究

摘 要

如何通过建成环境的塑造来影响居民的通勤出行方式选择，有效降低对小汽车的出行选择依赖，进而减少城镇交通出行碳排放已成为交通研究领域前沿热点问题，但是当前研究缺乏考虑通勤出行方式选择行为的空间异质性特征以及连续建成环境属性与出行选择行为之间非线性关系，不能准确刻画建成环境对通勤出行方式选择的影响，造成研究结果与真实情况存在较大偏差。本课题通过构建多层交叉分类离散选择模型和半参数回归整合离散选择模型，验证空间异质性和非线性关系的存在，准确揭示居住地和职住地建成环境对通勤出行方式选择的空间异质性影响和非线性关系。课题以珠三角区域中山市为例开展实证研究，基于通勤活动出行对上述模型和方法加以应用，结果表明尽管居住地建成环境属性对出行选择行为的非线性及空间异质性影响程度大于职住地，但居住地和职住地建成环境属性对出行选择行为都产生了显著的影响。该研究有助于深入理解建成环境对通勤出行决策行为的作用机理，为科学制定交通与土地使用规划方案或出行需求管理策略提供关键理论支撑。

关键词：建成环境；通勤出行；方式选择；空间异质性；非线性关系

Influence of residential and working built environment on commute mode choice: From low carbon perspective

Abstract

How to decrease commuters' car dependency and then reduce carbon emissions from urban transportation according to planning excellent built environment has been an important focus in transportation field. However, the lack of spatial heterogeneity and non-linear relationship between continuous built environment and travel behavior has compromised the effects of built environment on commute mode choice and caused a significant bias in results from previous study cases. This research attempts to construct cross-classified multilevel discrete choice model and integrate semi-parametric regression model with discrete choice model to accurately interpret spatial heterogeneity and non-linear relationship between built environment and travel behavior. Based on the surveyed data from Zhongshan metropolitan in China, the research indicated that although the spatial heterogeneity and non-linear characteristic are larger in residential locations than in working locations, built environment attributes of both residential and working locations have significant effects on commute mode choice. This research helps to produce profound understanding of relationships between built environments and commute mode choice behavior, providing key theoretical support for establishing transportation strategies, land use planning or travel demand management policies.

Key words:

Built environment, Commute behavior, Travel mode choice, Non-linear relationship

目 录

1	绪论.....	1
1.1	研究背景及意义.....	1
1.1.1	研究背景.....	1
1.1.2	研究意义.....	2
1.2	国内外研究状况.....	3
1.2.1	国内外研究现状.....	3
1.2.2	研究现状评述.....	6
1.3	主要内容及结构.....	7
1.4	研究创新点.....	8
2	研究内容及数据分析.....	9
2.1	研究内容.....	9
2.1.1	建成环境对通勤出行方式选择行为影响分析的逻辑框架构建.....	10
2.1.2	通勤出行方式选择行为的空间异质性与非线性关系验证分析.....	11
2.1.3	建成环境对通勤出行方式选择行为的影响建模.....	12
2.1.4	建成环境对通勤出行方式选择行为影响的实证研究.....	14
2.2	数据来源.....	16
2.2.1	交通调查数据.....	16
2.2.2	建成环境数据.....	17
3	职住地建成环境对通勤方式选择影响的模型构建.....	20
3.1	离散选择模型.....	20
3.2	多层交叉分类离散选择模型.....	20
3.3	半参数回归整合离散选择模型.....	22
4	职住地建成环境对通勤方式选择影响实证分析.....	24
4.1	离散选择模型结果与分析.....	24
4.2	多层交叉分类离散选择模型结果与分析.....	26

4.3 半参数回归整合离散选择模型结果与分析.....	32
结论.....	42
参考文献.....	44

1 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

全球气候变化是 21 世纪的重要议题，持续增长的不可再生能源消耗和温室气体（Greenhouse gas, GHG）的排放对全球生态环境造成巨大的威胁（顾朝林等，2009^[1]）。随着大气层中温室气体浓度的增加，全球气候变化可能会导致一系列严重的环境问题，比如极端天气和自然灾害的频繁发生，这些问题都将影响世界范围内的区域和城市的可持续发展。因此，作为人类生产和生活重要空间载体，城市成为减少能源消耗和温室气体排放以减缓气候变化的关注焦点，减少城市温室气体排放实现低碳的城市发展路径已成为世界众多国家和地区所采取的策略（陈飞，诸大建，2009^[2]；叶玉瑶等，2012^[3]；刘志林，秦波，2013^[4]）。

工业、建筑与交通是城市碳排放的三大主要来源，其中交通碳排放一直处于快速增长阶段。世界能源组织报告显示，全球因能源消耗产生的二氧化碳排放中，交通部门所排放的二氧化碳达到了约 25%，并预测这一比例将在 2030 年和 2050 年分别达到 50% 和 80%（IEA, 2009^[5]）。我国同样面临着交通碳排放不断增长的巨大压力，特别是随着大城市机动车拥有量的持续增加，职住空间分离导致通勤出行距离不断拉长，使得小汽车排放的二氧化碳逐渐上升并趋于主导地位，同时也带来了严重的负外部效应，如交通拥堵、雾霾极端天气和环境健康等问题（Frank, 2000^[6]；马静等，2011^[7]）。如何从根源上有效减少交通能耗和碳排放成为迫切需要解决的实践难题和理论研究的前沿性课题（姚胜永，潘海啸，2009^[8]；赵鹏军，2010^[9]；刘志林，秦波，2013^[4]）。

影响城市交通能源消耗和碳排放的因素众多且较为复杂，因此节约交通能源消耗和减少碳排放的措施及政策也是多样的。总体来讲，减少城市交通碳排放的相关措施可概括为三个方面（Cervero, Murakami, 2010^[10]）：一是，应用新的车辆耗能技术提高燃油效率，降低单位里程的能源消耗量；二是，开发新能源或燃料，降低单位能源的碳排放量；三是，通过城市空间规划形成面向绿色出行的建成环境，减少机动车出行选择。西方发达国家的经验表明，通过车辆耗能和燃料技术的提高在短期内对个体机动车的减排是有

效的,但是技术进步所带来的减排效果会被快速增长的小汽车拥有和使用所抵消(Ewing et al., 2008^[11])。

相对于交通拥堵收费、车辆单双号限行以及燃油税费等出行需求管理(Transportation demand management, TDM)措施而言,发挥城市建成环境对交通出行影响的正面作用,降低人们的小汽车依赖,被认为是减少交通能耗及其碳排放的根本所在(Brownstone, Golob, 2009^[12]; Hong et al., 2014^[13]; Hong, Shen, 2013^[14])。更为关键的是,城市建成环境形成会对居民日常出行行为产生根深蒂固的影响,在宏观层面决定了城市居民活动的空间分布,并且城市建成环境一旦形成就很难去改变,具有一定的“锁定效应”(柴彦威等, 2012^[15])。因此,城市建成环境优化被认为是建设低碳城市,应对气候变化的重要政策手段。鉴于通勤出行为人们日常活动出行中最重要且最具规律性的组成部分,如何通过优化城市建成环境来影响通勤出行需求,减少小汽车拥有和使用以及促进居民向绿色出行的转变,进而减少城市交通碳排放已成为城市规划及相关领域的国内外学者关注的前沿热点问题(Ewing et al., 2008^[11]; Hong, Goodchild, 2014^[16]; Hong, Shen, 2013^[14]; Yang, Ferreira, 2009^[17]; Yang, 2008^[18])。要回答怎样的建成环境有利于降低小汽车依赖减少通勤小汽车出行,需首先要探索出“建成环境-出行行为”之间的微观机理,深入微观个体层次揭示居住地和工作地建成环境与通勤出行行为之间的关系,厘清建成环境不同要素对通勤出行方式选择行为具体影响的作用程度和作用路径,分析建成环境的改变是否可以有效地降低小汽车拥有和通勤出行使用。

鉴于此,本研究拟通过紧密结合交通工程学、城乡规划学、行为科学和系统科学等相关学科的最新成果,从微观个体行为视角出发,通过构建数学模型定量研究居住地和工作地建成环境对通勤出行方式选择行为的影响机制。一方面,对丰富和发展城市形态与交通影响机制研究具有重要的理论价值,为建成环境与出行行为二者关联机制建模等提供关键技术支撑;另一方面,通过优化建成环境降低小汽车出行依赖,从而降低交通能源消耗以及碳排放也具有重要的现实意义。

1.1.2 研究意义

本课题为城市规划领域当前的国际前沿课题——从通勤活动出行的角度出发,在考虑不同地理单元的空间异质性和连续建成环境属性与出行选择行为之间非线性关

系的基础上，基于微观个体视角剖析居住地和 workplace 建成环境对通勤出行方式选择行为的影响。本研究在揭示建成环境对通勤出行方式选择行为的影响过程中，弥补了以往研究缺乏对空间异质性及非线性关系考察不足以及仅关注居住地建成环境影响的现状，统筹分析通勤出行方式选择行为的空间异质性特征、连续建成环境属性与出行选择行为之间的非线性关系，以及居住地和 workplace 建成环境对通勤出行方式选择行为的影响，能够更加有效地分析职住地建成环境对通勤出行决策行为的影响过程与结果。本课题通过构建二元 probit 模型，并基于二元 probit 模型联合构建多层交叉分类离散选择模型和半参数模型，实现了对空间异质性以及非线性关系的考察，通过最大似然估计、贝叶斯估计法以及带惩罚项的极大似然估计对模型参数进行估计，在揭示出居住地和 workplace 建成环境对通勤出行方式选择行为和家庭小汽车拥有的影响的同时，能够捕捉通勤出行方式选择行为和家庭小汽车拥有的空间异质性情况，挖掘出建成环境通过非线性关系影响通勤出行方式选择行为的机制。构建的模型可为出行方式选择行为分析提供关键的建模技术支持。

本课题将行为科学的理论应用于通过改变建成环境来促进居民出行方式选择行为转变进而降低交通碳排放研究中，充分考虑行为主体的出行行为特征以及不同城市建成环境要素对通勤出行行为影响差异敏感性，为现阶段相关类型的城市交通与土地使用规划实践或出行需求管理策略制定提供理论依据和决策支持。通过优化城市建成环境来影响通勤出行需求，减少小汽车拥有和使用以及促进居民向绿色出行的转变，进而减少城市交通碳排放。

1.2 国内外研究状况

1.2.1 国内外研究现状

小汽车的过度使用对空气品质会造成严重的影响，为降低小汽车依赖以应对全球气候变化，近年来学界对建成环境和家庭或个人出行之间的关联机制的探讨已成为城市规划领域的重要研究课题之一（Ewing et al., 2008^[11]; Cervero, 2002^[19]; Currie, 2006^[20]; Lund, 2006^[21]; Guerra, Cervero, 2011^[22]）。众所周知，交通碳排放来自机动车的出行选择和使用，因此对于交通碳排放的降低也应从机动车的选择和使用方面入手：转变居民交通出行方式选择行为，促进小汽车出行向低碳出行模式的转变。鉴于交通碳排放是建成

环境影响居民出行方式选择及机动车使用的衍生结果 (Handy et al., 2002^[23]; Boarnet, 2011^[24]), 因此学界对建成环境和交通碳排放之间关系的研究主要集中在交通出行方式选择方面。

离散选择模型 (Discrete choice model, DCM) 是诸多学者研究建成环境对出行方式选择行为影响的主要方法, 其主要包括多项 Logit 模型和嵌套 Logit 模型。该方法基于随机效应理论, 即假定出行个体的决策行为是受一系列内在与外在因素的影响, 出行者从最大效用的角度出发做出决策行为 (Zhang, 2004^[25]; Maat et al., 2005^[26]; Scheiner, Rau, 2007^[27]; 韦亚平, 潘聪林, 2012^[28])。在效用模型中, 随机效用由确定性部分和随机部分构成: 确定性部分考虑了研究群体出行决策行为中平均倾向的影响, 而随机部分为观察不到的决策行为信息, 反映群体出行决策行为中存在的差异。在基于随机效用理论的建成环境对交通行为的影响研究中, 认为只要存在建成环境中的某些特征 (如土地使用密度、路网结构、可达性等) 与交通出行行为的“效用”相关, 即不同的建成环境可以影响出行主体对某种出行模式或路径的“效用”大小, 则可对建成环境的改变可能引起的交通出行行为的变化进行预测判断 (Crane, Crepeau, 1998^[29]; Zegras, 2004^[30]; Cervero et al., 2009^[31])。

Reilly 和 Landis^[32]最早从随机效用的角度探讨了建成环境对交通出行效用的影响, 指出慢行倾向的城市环境设计、高密度开发、混合使用的土地模式能够增加步行和自行车出行的舒适性, 缩短居民活动出行距离, 但却可能增加小汽车拥挤成本和停车成本, 降低小汽车行驶速度, 这种城市建成环境提高慢行出行效用的同时对小汽车出行效用产生负向的作用。以美国马里兰州 Montgomery 郡为例, Cervero^[19]利用二元 logit 模型和多项 Logit 模型研究了建成环境对通勤出行方式选择行为的影响, 研究结果验证了建成环境对居民出行方式选择行为的影响, 然而不同建成环境要素的影响程度存在差异。Zhang^[25]基于多项 Logit 模型对比研究了美国波士顿和中国香港地区的土地使用在影响居民出行方式选择行为的差异, 实证结果显示出行起讫点的建成环境均对居民出行方式选择行为具有影响。然而, 在影响程度上土地使用策略是有限的, 指出应配合交通需求管理策略才能使得土地使用策略更加富有效率。

利用微观个体行为信息, 探索建成环境对出行方式选择行为的影响, 不但可以对建成环境各要素对出行方式选择行为是否具有显著性影响做出判断, 而且还可以得出建成

环境各要素对出行方式选择行为的影响程度，给予城市交通与土地使用规划方案或政策的制定提供有价值的参考（Ewing, Cervero, 2010^[33]; Coogan et al., 2012^[34]）。同时，还能够剖析出不同年龄、收入等群体在出行方式选择行为上的偏好差异，有利于城市决策者有针对性地制定外部政策以促进居民小汽车出行向绿色出行模式的转移。由于基于随机效用的离散选择模型具有建模简单且容易求解等优点，成为研究建成环境对出行方式选择行为影响的主要分析工具。然而，基于离散选择模型的研究方法只能捕捉到建成环境对于出行方式选择行为的直接影响，无法捕捉建成环境对出行方式选择行为的非线性影响（Fukuda, Yai, 2010^[35]）。忽略非线性关系无法准确地判断建成环境属性在不同范围对出行选择影响的不同程度，进而影响到城市交通规划方案或决策者政策的制定。但目前，国内外鲜有学者对建成环境与出行选择行为之间非线性关系进行研究，这不利于连续建成环境属性与出行选择行为之间准确关系的考究。

除了鲜有建成环境属性与出行选择行为之间非线性关系研究，也缺乏空间异质性问题的考虑和定量研究。由于土地使用数据资料获取的限制，对建成环境要素指标的度量通常是在某一集聚层面，比如微观层面的邻里单元、中观层面的交通分区。因此，就导致了样本中相当一部分群体来自同一邻里单元或交通分区，他们由于受共同建成环境的影响而在交通出行行为上具有某种程度的相似性，而与来自其它调查区域的群体之间则产生了差别，这种现象称为空间异质性。当样本中街区或交通分区的建成环境存在较大差异时，忽略空间异质性的研究往往会得到偏倚的结论。然而，由于考虑空间异质性的数学建模及参数估计方法较为复杂，在研究建成环境对出行方式选择行为的影响时，空间异质性问题往往被忽略。近年来，学者们逐渐意识到考虑空间异质性问题的重要性，为刻画和理解人们的日常行为在空间上的差异程度，已有学者尝试采用先进的建模方法研究了考虑空间异质性的居住地建成环境对机动车出行距离的影响（Zhang et al., 2012^[36]; Hong et al., 2014^[37]）。然而，考虑空间异质性的建成环境对出行方式选择行为的研究较少，其主要原因在于缺乏关联机制建模及量化空间异质性等关键技术的支撑。

基于城市建成环境对交通碳排放的研究中，职住空间分离对出行行为的影响以及引起的通勤格局变化已成为近年来学界广泛探讨的课题（Shuttleworth, Gould, 2010^[37]; Manaugh et al., 2010^[38]）。通勤出行具有出行时间、地点相对固定等特性，每日发生的规律性相对较强，从宏观层面上讲，一旦城市空间结构形成，职住空间分离格局对通勤出

行具有更为深刻的影响 (Maat, Timmermans, 2009^[39])。以北京为例, 诸多学者从不同居住社区类型研究了职住空间分离对通勤出行行为的影响, 研究表明城郊居住社区居民通勤距离和通勤时间显著增加, 对居民出行碳排放具有重要影响 (冯健, 周一星, 2004^[40]; 刘志林等, 2009^[41]; 孙斌栋等, 2010^[42]; 柴彦威等, 2011^[43]; 周江评等, 2013^[44]; Wang, Chai, 2009^[45]; Zhao, 2011^[46])。然而, 这些研究并没有分离出不同建成环境要素对交通出行的具体影响, 这种可观察到的社区汇总层面的交通出行特征差异只能被认为是多个建成环境要素的综合影响, 无法从微观个体层面揭示职住地建成环境对交通出行行为影响的深层次机制。诸多研究表明, 通勤出行决策行为不仅受到居住地建成环境的影响, 同时也受到工作地建成环境的影响 (Cervero, 2002^[19]; Zhang, 2004^[25]; Acker, Witlox, 2011^[47])。统筹考虑居住地和工作地建成环境对通勤出行的影响成为当前前沿课题之一。

1.2.2 研究现状评述

在研究建成环境对出行方式选择行为的影响时, 空间异质性问题往往容易被忽略。空间异质性往往由于一些参与交通调查的出行者来自同一地理分区, 从而在出行选择行为上具有某种相似性。忽略空间异质性问题的考虑容易造成建成环境对出行选择行为影响机制的不准确估计, 从而导致土地利用及交通设施布局的不合理分配。由于模型构建的复杂性, 空间异质性问题近几年来才在学界逐渐被考虑, 在以往国内外多个城市的研究案例中, 空间异质性在出行选择行为中的重要影响也已得到验证, 并且有待于深入研究, 为其他多种交通行为分析中存在的难题进行联合建模。

在建成环境对于出行方式选择行为的影响研究中, 缺乏考虑建成环境与出行方式选择行为之间的非线性关系的研究。文献综述显示目前非线性关系问题关注还很匮乏, 以往的研究大都认为某个建成环境属性在变化范围内对出行选择行为的影响程度是固定的, 缺乏非线性的变化影响进行研究, 统计方法和建模技术等研究方法有待加强。

缺乏职住地建成环境对通勤出行方式选择行为影响的系统理解和描述。对于通勤出行而言, 起讫点的建成环境均会对其出行行为产生影响, 同时考虑居住地和工作地的建成环境对通勤者微观出行行为的影响, 增加了行为决策的不确定性和复杂性, 对分析方法提出了更高的要求。由于出行终点的建成环境要素指标数据较难获取, 因此目前已有研究比较缺乏对出行目的地建成环境的有效描述和度量, 在分析建成环境对通勤出行行

为的影响时，大都是只考虑了居住地的建成环境所带来的影响，常常忽略工作地的建成环境影响或进行理想化的假设。然而，工作地的建成环境对通勤出行决策行为亦有着至关重要的影响（Cervero, 2002^[19]; Zhang, 2004^[25]），是准确理解职住地建成环境对交通出行影响的关键，因此不能被忽略掉。从关联机制建模的角度出发，如何构建模型统筹分析居住地与工作地建成环境对通勤出行方式选择行为的影响还有待深入研究。

鉴于此，本课题从降低小汽车依赖的角度出发，力求解决的主要问题是如何通过建成环境的改变降低家庭小汽车拥有和出行选择，促进居民出行行为从小汽车依赖向绿色出行模式的转变。围绕这一中心思想，科学构建数学模型准确揭示建成环境对通勤出行方式选择行为的影响是非常必要的前提，由此构成了本课题核心问题的研究框架。

1.3 主要内容及结构

本课题以职住地建成环境对通勤出行方式选择行为的影响为研究对象，针对以往研究缺乏对空间异质性和非线性问题的考虑，从作用机理和框架解析、影响机制建模、典型实证分析等层面入手，基于活动出行视角来系统深入地研究职住地建成环境对通勤出行方式选择行为的影响机制，并以中山市为例，针对其“建成环境-出行行为”内在影响机理及规划引导措施展开实证研究，在取得相关理论研究成果的基础上，为今后推进低碳交通规划、建设低碳城市的相关实践决策提供理论支撑、定量依据和参考借鉴。本课题针对国内外研究现状的不足，基于微观个体行为视角，力图在揭示建成环境对通勤出行方式选择行为作用机理上进行突破和创新。

本课题主要研究内容包括四个部分，其中：第一部分为构建职住地建成环境对通勤出行方式选择行为影响分析的逻辑框架，旨在为后续开展系统的理论研究和构建模型奠定基础；第二部分为通勤出行方式选择行为的空间异质性与非线性关系验证分析，旨在构建数学模型验证通勤出行方式选择行为在居住地和工作地交通分区尺度上存在空间异质性，以及连续建成环境与出行选择行为之间的非线性关系；第三部分为在考虑空间异质性与非线性关系的基础上，开展职住地建成环境对通勤出行方式选择行为的影响研究，旨在构建数学模型同时捕捉空间异质性与非线性关系，以期为准确揭示职住地建成环境对通勤出行方式选择行为的影响提供技术支撑；第四部分为职住地建成环境对通勤出行方式选择行为影响的实证研究，以中山市为例应用本研究构建的有关模型和方法，

分析职住地建成环境对通勤出行方式选择行为的影响，提出城市交通与土地使用规划建议和交通需求管理策略。

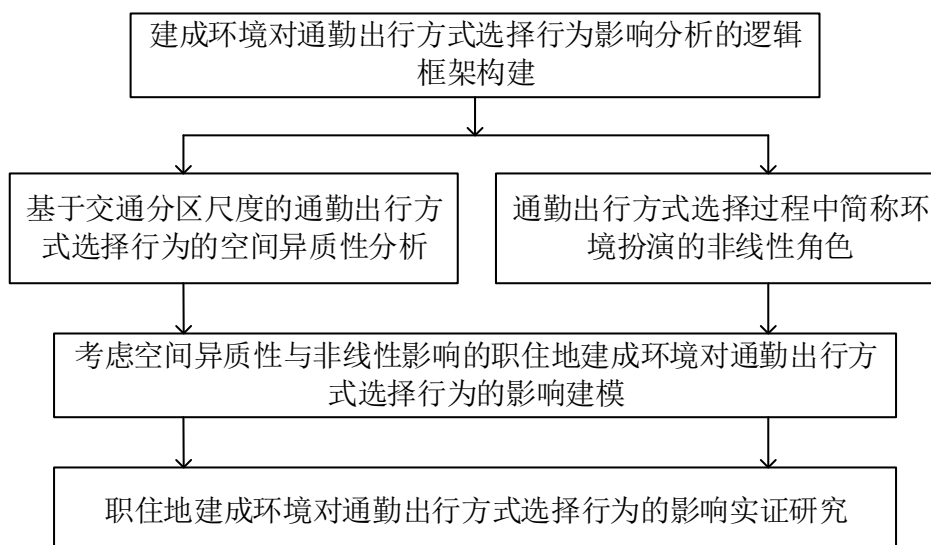


图 1-1 总体思路框图

1.4 研究创新点

本课题为城市交通规划领域当前的国际前沿课题——从通勤活动出行的角度出发，在考虑空间异质性与非线性关系的基础上，基于微观个体视角剖析居住地和职住地建成环境对通勤出行方式选择行为的影响。本研究的特色与创新之处在于：

(1) 研究视角上的创新，在揭示建成环境对通勤出行方式选择行为的影响过程中，弥补了以往研究缺乏对空间异质性和非线性关系考察不足以及仅关注居住地建成环境影响的现状，统筹分析通勤出行方式选择行为的时空异质性特征、连续建成环境属性对出行选择行为非线性影响关系，以及居住地和职住地建成环境对通勤出行方式选择行为的影响，能够更加有效地分析职住地建成环境对通勤出行决策行为的影响过程与结果。

(2) 研究方法上的创新，通过构建二元 probit 模型、多层交叉分类离散选择模型、半参数模型与离散选择整合模型，实现了对空间异质性以及非线性关系的考察，通过极大似然估计、贝叶斯估计法以及带有惩罚项的极大似然估计对模型参数进行估计，在揭示出居住地和职住地建成环境对通勤出行方式选择行为和家庭小汽车拥有的影响的同时，能够捕捉通勤出行方式选择行为和家庭小汽车拥有的空间异质性情况，挖掘出连续建成环境与出行选择行为之间的非线性关系。构建的模型可为出行方式选择行为分析提供关键的建模技术支持。

2 研究内容及数据分析

2.1 研究内容

本课题针对国内外研究现状的不足，基于微观个体行为视角，力图在揭示职住地建成环境对通勤出行方式选择行为作用机理上进行突破和创新。本课题主要研究内容包括四个部分（如图 2 所示），其中：第一部分为构建职住地建成环境对通勤出行方式选择行为影响分析的逻辑框架，旨在为后续开展系统的理论研究和构建模型奠定基础；第二部分为通勤出行方式选择行为的空间异质性与非线性关系验证分析，旨在构建数学模型验证通勤出行方式选择行为在居住地和 workplace 交通分区尺度上存在空间异质性，以及建成环境属性对通勤模式选择的非线性影响机制；第三部分为在分别考虑空间异质性与非线性关系的基础上，开展职住地建成环境对通勤出行方式选择行为的影响研究，旨在构建数学模型同时捕捉空间异质性与非线性关系，以期准确揭示职住地建成环境对通勤出行方式选择行为的影响提供技术支撑；第四部分为职住地建成环境对通勤出行方式选择行为影响的实证研究，以中山市为例应用本研究构建的有关模型和方法，分析职住地建成环境对通勤出行方式选择行为的影响，提出城市交通与土地使用规划建议和交通需求管理策略。

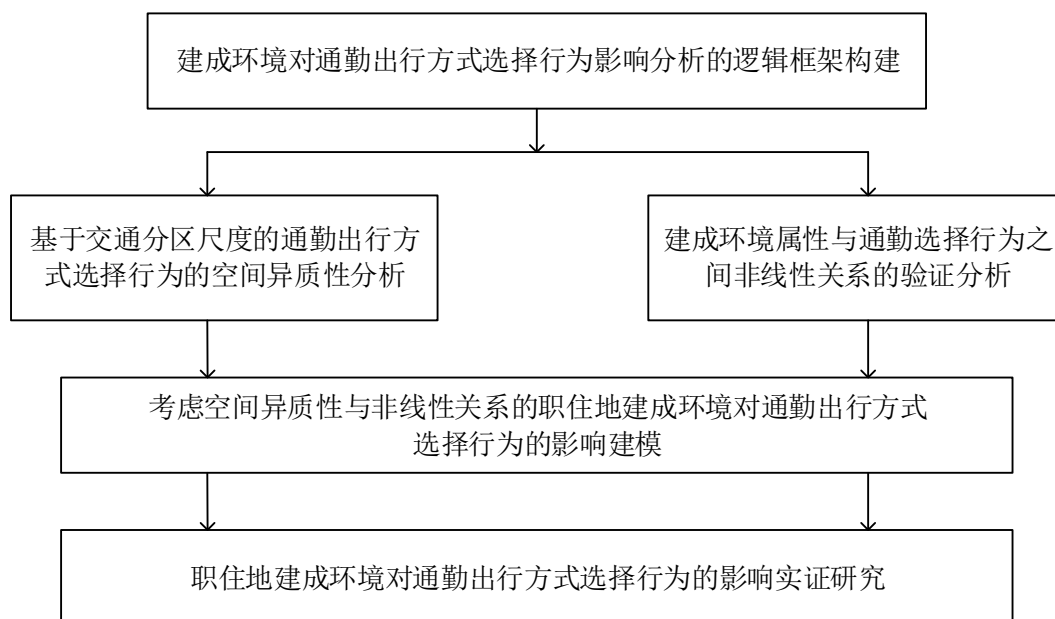


图 2-1 总体思路框图

2.1.1 建成环境对通勤出行方式选择行为影响分析的逻辑框架构建

解析建成环境要素构成，基于“土地使用-交通”互动反馈机理分析职住地建成环境对通勤出行的影响过程，从微观个体行为视角出发，构建职住地建成环境影响通勤出行方式选择行为的逻辑框架，明确从低碳规划角度入手调控优化城市土地使用降低通勤小汽车出行选择的系统过程，界定建成环境对通勤出行方式选择行为影响的核心环节及相互关联。具体研究内容包括：

* 建成环境要素构成解析。从宏观、中观和微观多尺度解析建成环境要素构成，剖析建成环境“5D”规划要素（土地使用密度、土地使用混合度、道路网络设计、区域可达性以及到公共交通站点距离）的产生背景和发展历程，挖掘其规划理论基础和原理，厘清建成环境不同要素之间的内在关联。

* 职住地建成环境对通勤出行方式选择行为影响的定性分析。建成环境深刻影响着人们职住的空间选择，进而决定了人们日常活动的空间分布与流向。依据建成环境对交通出行影响的时间维度，通勤出行属于城市中观层面的社会活动，因此有必要将建成环境的研究尺度界定为交通分区层面。结合国内外文献定性分析建成环境“5D”规划要素、出行者社会经济特征属性等因素对通勤出行方式选择行为的影响，为本课题研究提供基础。

* 影响分析的逻辑框架构建。从低碳规划角度入手，明确职住地建成环境对通勤出行影响的核心环节（主要包括：家庭小汽车拥有、通勤出行方式选择），并理清不同环节之间的相互关联。依据界定的职住地建成环境“5D”规划要素，分析各建成环境要素以及非建成环境要素（如性别、年龄、收入等出行者社会经济特征属性）对通勤出行方式选择行为的可能影响路径，采用系统工程学的原理和方法，构造职住地建成环境要素与基于通勤活动出行的出行方式选择行为之间的因果关系逻辑框架。

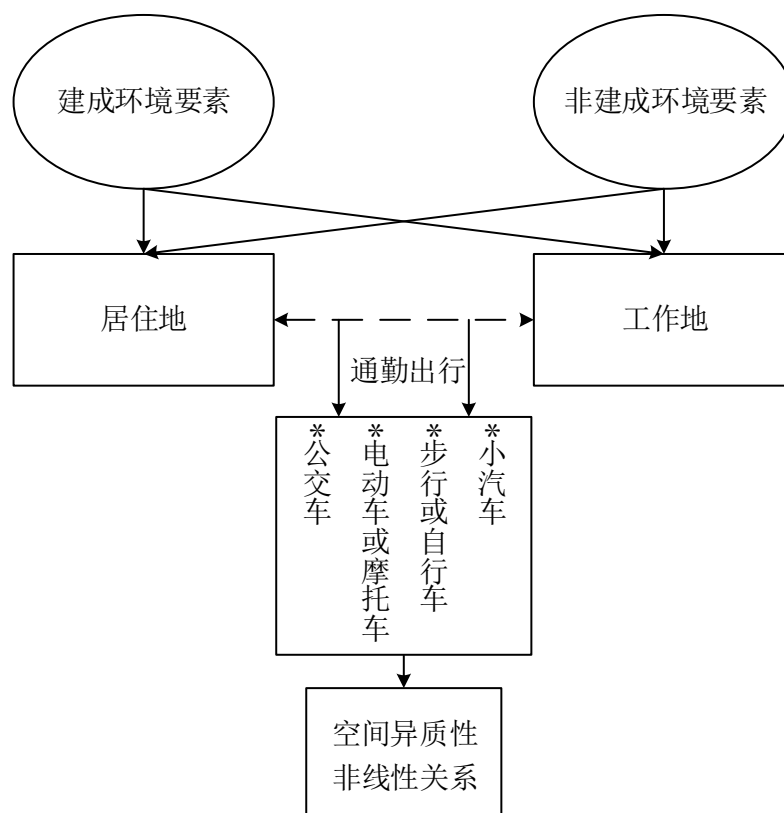


图 2-2 课题解析逻辑框架图

2.1.2 通勤出行方式选择行为的空间异质性与非线性关系验证分析

考虑到来自相同交通分区的通勤者由于受到相同建成环境的影响，使得通勤出行方式选择行为具有较强的空间异质性，以及建成环境对出行选择行为的非线性影响，为此有必要构建数学模型量化空间异质性和非线性关系，验证空间异质性和非线性关系是否显著存在。具体研究内容包括：

* 构建多层交叉分类离散选择模型（Cross-classified multilevel DCM）分析通勤出行方式选择行为在职住地交通分区尺度上的空间异质性。考虑到通勤出行方式选择行为同时受到居住地和在工作地建成环境的影响，此时通勤者既嵌套于居住地又嵌套于工作地，而居住地与工作地又存在交叉的关系，因此通勤者与居住地、工作地之间不再属于单纯的嵌套关系，而为复杂的交叉分类嵌套关系。为此，本课题尝试将多层交叉分类（Cross-classified multilevel）建模思想融入离散选择模型中，以期能够量化在交通分区尺度上通勤出行方式选择行为在职住地出行起讫点上的空间异质性，识别出方式选择行为的空间异质性多大程度上是由建成环境差异引起，多大程度是由个人及家庭社会经济特征等因素引起。验证通勤出行方式选择行为的空间异质性存在，则在出行方式选择行

为建模过程中必须将其考虑。

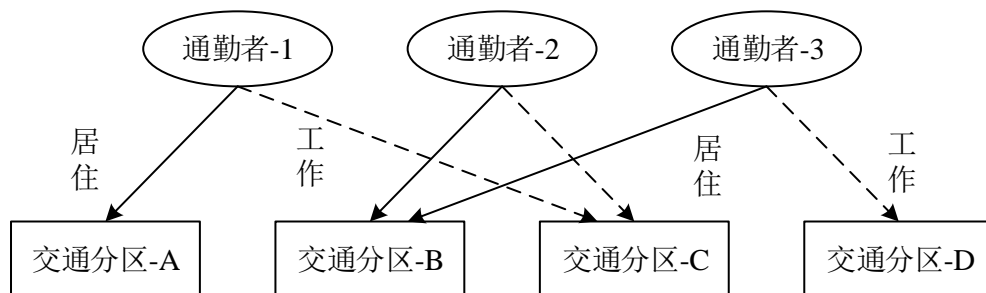


图 2-3 通勤者与“职-住”地交通分区的交叉分类嵌套关系示意图

* 基于二元选择模型构建半参数回归模型 (Semiparametric Regression Model) 分析连续的建成环境属性与二元的出行选择行为之间的非线性关系。半参数模型包含线性的参数部分及非线性的非参数部分，非线性的非参数部分则能刻画连续解释变量与结果变量之间的非线性影响程度。连续变化的建成环境属性往往对通勤者的出行选择并不产生恒定的线性影响，然而以往的线性建模分析则假设这种影响是线性恒定的变化，和实际的影响关系有所差异。本课题融入半参数模型的思想于二元的 probit 模型，对连续建成环境变量部分的建模引入样条函数，用多维度的样条基函数拟合建成环境属性对出行选择行为之间非线性影响的程度。

2.1.3 建成环境对通勤出行方式选择行为的影响建模

从微观个体行为视角出发，出行方式选择是交通碳排放产生的最为关键的环节，本课题通勤出行方式选择行为建模的目标是准确揭示职住地建成环境在通勤出行方式选择行为决策过程中的作用机理，其核心问题是在于准确捕捉怎样的职住地建成环境能够降低通勤者小汽车出行方式选择，从而促进向低碳出行方式（公共交通、步行或自行车出行）的转变。考虑到通勤出行方式选择行为的空间异质性，以及建成环境属性与出行选择行为之间的非线性关系，为此有必要构建能够量化空间异质性与非线性关系的分析模型，以能够准确分析职住地建成环境对通勤出行方式选择行为的影响。具体研究内容包括：

* 分别构建二元 probit 模型分析个人社会经济属性和职住地建成环境属性对小汽车行为选择，步行或自行车行为选择，电动车或摩托车行为选择以及公交车行为选择等四种通勤方式的影响程度。将每一类出行选择方式作为一个二元的结果变量，构建二元 probit 模型可以初步分析不同建成环境属性变量对不同出行选择行为的整体影响。然而

由于未考虑职住地层面的空间异质性和非线性关系，二元 probit 模型估计结果的准确确定还有待验证。

* 基于二元 probit 模型构建多层分类模型考虑空间异质性，揭示居住地和在工作地建成环境对通勤出行方式选择行为的影响。在交通分区空间尺度上，考虑到通勤出行方式选择行为存在空间异质性问题，本课题尝试将多层交叉分类建模思想融入到结构方程与离散选择整合模型中，以期能够量化空间异质性参数，准确反映通勤出行方式选择行为在居住地和在工作地上的空间异质性程度。同时，与忽略空间异质性的模型结果进行对比，度量出复杂整合模型在拟合优度和参数估计上的贡献，为城市交通与土地使用规划及制定通勤出行需求管理策略提供依据。在以往基于结构方程模型或离散选择模型的建成环境对交通出行影响研究中，大都存在样本数据服从正态分布的假设，普遍采用最大似然估计法 (Maximum likelihood, ML) 进行模型参数估计。然而，在城市研究中采集的众多数据很难满足数据服从正态分布这一要求，依然采用 ML 法进行求解势必会造成模型参数估计结果的不准确。考虑到同时量化空间异质性参数和非线性关系的要求，本课题尝试采用贝叶斯 (Bayesian) 估计法编写程序对模型进行参数估计，以处理采集的样本数据中存在的非正态分布问题。

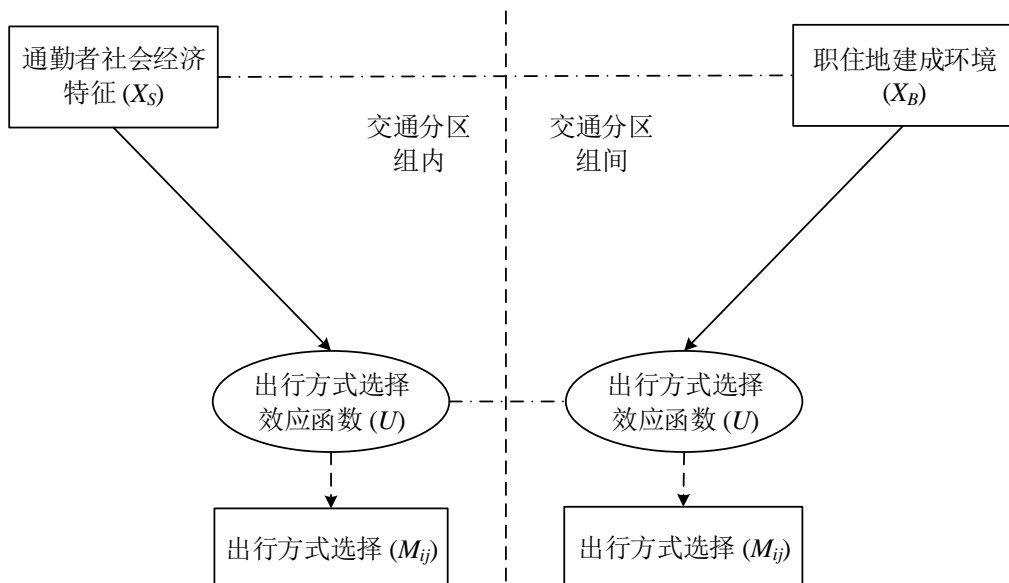


图 2-4 基于二元 probit 模型的多层交叉分类模型框架图

* 基于二元 probit 构建半参数模型分析连续建成环境属性对出行选择行为之间的非线性影响。模型结构如图 2-5 所示，半参数模型包括线性的参数部分和非线性的非参数

部分，通过线性部分衡量离散的个人社会经济属性作用于通勤选择行为之间的影响程度，通过非线性部分揭示连续的职住地建成环境属性作用于出行选择行为的影响程度。由于用多维样条基函数衡量每个连续简称环境属性非线性影响的程度，因而多维样条函数曲线往往存在过度波动的特性，需要在极大似然估计中引入一个惩罚项，去平滑样条函数曲线。

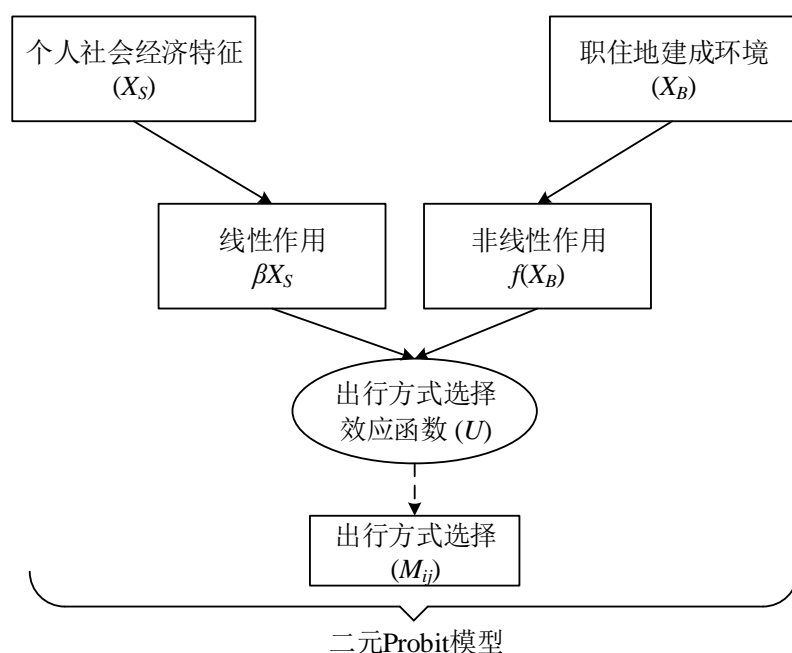


图 2-5 基于二元 probit 模型的半参数模型结构

通过复杂整合模型的构建，不仅可以探索职住地建成环境对通勤出行方式选择行为的影响，而且也能够捕捉通勤出行方式选择行为的空间异质性情况，挖掘出连续建成环境属性对通勤出行方式选择行为的非线性影响，进而深化对职住地建成环境对通勤出行方式选择行为影响的理解。

2.1.4 建成环境对通勤出行方式选择行为影响的实证研究

我国与西方发达国家城市形态存在较大差异，建成环境对交通出行的影响结果不尽相同。更为重要的是，我国目前正处于快速城镇化发展阶段已经社会经济转型过程中，城市形态面临着剧烈的重组与重构，随着机动车保有量的不断提高，居民的日常出行行为也面临着巨大的变化，如何从城市交通与土地使用规划角度着手降低通勤出行碳排放成为迫切需要解决的重大问题。中山市为我国典型的珠三角快速城市化地区，镇域经济

为主导的多组团城市发展特征突出，国家住房和城乡建设部与中山市政府提出共建“低碳生态示范城”，中山市亦在积极打造“公交都市示范城”，探索低碳交通新路径，而通过城市交通与土地使用规划来引导居民出行需求降低交通碳排放是其中的重点之一。因此，以中山市为例，深入分析我国城市建成环境对通勤出行方式选择行为的影响机制，发现其中的规律和问题具有重要理论和现实意义。

以中山市为例，利用 2012 年中山市大规模家庭居民出行调查数据和土地使用调查数据，采用 ArcGIS 软件度量获得交通分区建成环境“5D”规划要素指标，应用并检验本课题提出的有关模型和方法，分析职住地建成环境对通勤出行方式选择行为的影响机制，为应对全球气候变化降低交通碳排放背景下的城市交通规划提供决策依据。具体研究内容包括：

* 基于交通分区空间尺度的建成环境“5D”规划要素测度。本课题将研究尺度界定为交通分区层面，既是考虑研究目的的需要，又是考虑研究数据的可获得性。交通分区是城市交通研究中的最小分析单元，是土地使用性质、居民结构、交通特点相似地区的结合体，具有同质性。采集城市土地使用、居住、就业岗位以及公共交通站点设施等基础数据信息，采用 ArcGIS 软件通过编写 VB 程序（Visual Basic, VB）测度每个交通分区的建成环境要素（土地使用密度、土地使用混合度、道路网络设计、区域可达性以及到公共交通站点距离）。

* 基于活动出行的职住地建成环境对通勤出行方式选择行为的影响研究。以中山市市域为研究范围，利用采集的中山市大规模出行调查数据，建立早上上班时段（7:00-9:00）由家出发至工作地的通勤活动出行，结合度量的交通分区尺度的建成环境要素指标，依据构建的理论模型和模型参数估计方法，利用 Mplus 和 R 软件编写程序，实证通勤出行方式选择行为的空间异质性特征以及建成环境属性与出行选择行为之间的非线性关系，通过复杂整合模型系统地揭示考虑空间异质性与非线性关系的职住地建成环境的影响过程与影响结果，揭示居住地和工作地建成环境对通勤出行方式选择行为的影响。

* 低碳出行视角下中山市职住空间建成环境优化及交通需求引导策略研究。根据影响机制的分析结果，从城市交通与土地使用规划角度探讨降低通勤者小汽车出行依赖的中山市职住空间建成环境优化及规划引导策略，促进小汽车出行向低碳出行模式转变，良性引导居民的通勤出行方式选择以减少通勤出行碳排放。

2.2 数据来源

研究所需中山市交通调查数据及建成环境属性数据已经获取。本课题实证研究的前提是获取 2012 年中山市大规模家庭居民出行调查数据、交通分区数据以及土地使用数据，申请人通过参加国家自然科学基金项目“快速城市化地区基于土地利用的居民出行碳排放机理与模拟研究——以深圳为例”（编号：41371169）已经积累了相关经验。

2.2.1 交通调查数据

图 2-6 是中山市的区位图，中山市位于中国南部的广东省，一共包括 24 个区或镇域，是中国经济最为发达的海岸城市之一，常住人口 312.09 万，占地面积 1783.67 平方公里。截止 2012 年，中山市的城镇化水平，人均收入，户均小汽车拥有量，户均摩托车拥有量分别是全国平均水平的 1.7 倍，1.8 倍，1.8 倍及 2.8 倍。

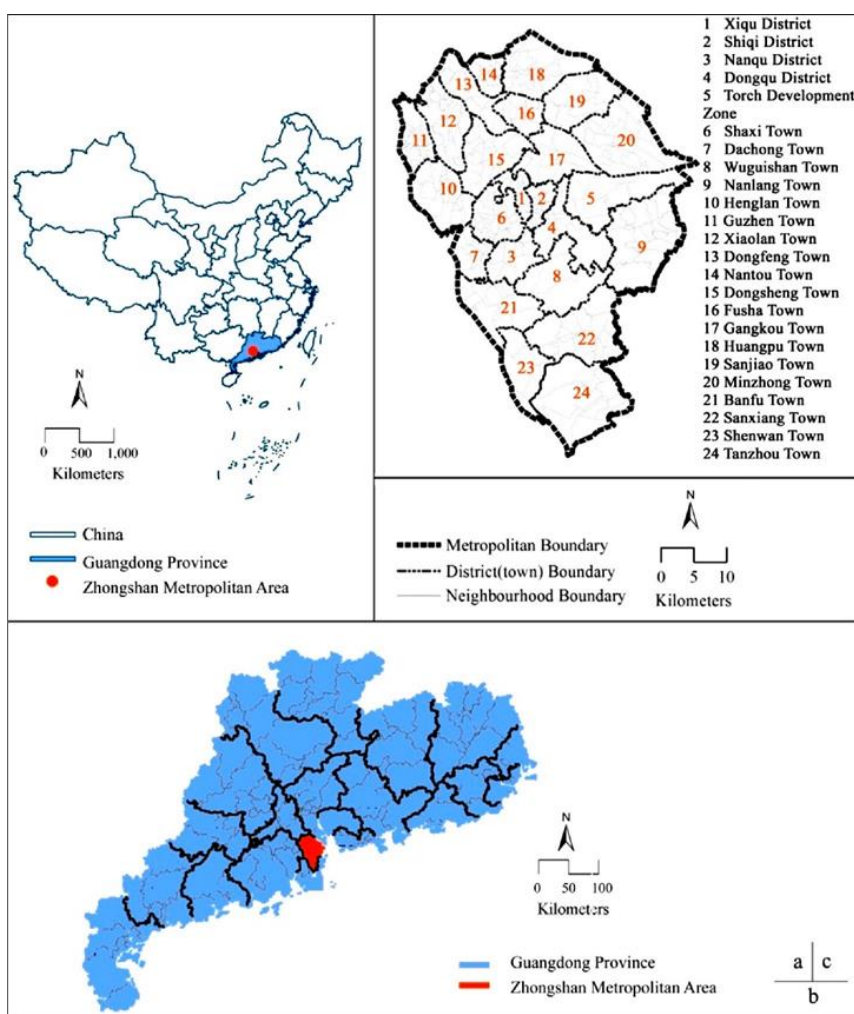


图 2-6 中山市地理区位图

中山市 2012 交通调查问卷涉及 26500 个家庭，共 58628 人次，被调查者一日之内产生的出行次数一共 145262 次。调查人数占到中山市总人数的 1.88%，覆盖中山市的 24 个区或镇域。筛选 18 岁以上的调查对象早上 7:00-9:00 从家出发以上班为目的数据，去除有缺失值的样本之后，共有 28778 次有效出行数据。调查问卷数据共包含两部分，个人社会经济属性调查数据及个人出行调查数据。社会经济属性包括性别、年龄、户口、职业、个人月经济收入、汽车驾、户类型、本户人口、户全年总收入等，出行调查问卷主要包括的调查内容有出发交通小区及用地性质，出发时刻，出行目的，到达交通小区及用地性质，达到时刻，交通方式等。本课题选用的主要社会经济属性如表格 2-1 所示。可知在早高峰通勤调查对象范围内，男性调查对象占 59%，中年调查对象占 59%，机关工作人员占 5%，中等收入占 63%，关于通勤方式，12%的通勤者选择小汽车出行，18%选择步行或自行车，65%选择电动车或摩托车，仅有 3%选择公交车。从调查数据可知相比于中国一般大城市 6%-25%的公交分担率，中山市的公交分担率时较低的，这可能与其电动车和摩托车通勤的便捷性有关。

表格 2-1 主要交通调查数据统计

个人社会经济属性		变量解释	均值	标准差
性别		男性=1，女性=0	0.59	0.49
年龄	年轻人	年龄<30 岁	0.39	0.49
	中年人	30 岁<=年龄<60 岁	0.59	0.49
	老年人	年龄>=60 岁	0.01	0.11
职业		职业为机关工作人员=1，否则=0	0.05	0.22
户均年收入	低收入	户年收入<2 万人民币	0.14	0.35
	中等收入	2 万人民币<=户年收入<6 万人民币	0.63	0.48
	高收入	户年收入>=6 万人民币	0.23	0.42
通勤方式	小汽车	通勤方式选择小汽车=1，否则=0	0.12	0.32
	步行或自行车	通勤方式选择步行或自行车=1，否则=0	0.18	0.39
	电动车或摩托车	通勤方式选择电动车或摩托车=1，否则=0	0.65	0.48
	公交车	通勤方式选择公交车=1，否则=0	0.03	0.17

2.2.2 建成环境数据

中山市 24 个区或镇域共划分为 274 个交通小区，2012 年的交通调查数据覆盖 274 个交通小区，分析建成环境属性对通勤选择行为的影响必须提取出建成环境属性。原始

的建成环境属性从中山市规划局、交通局和市政局获取。基于 ArcGIS 有关方法技术来测度交通分区尺度的建成环境“5D”规划要素指标的具体方法和技术。将 ArcGIS 作为空间分析和可视化建成环境要素指标的工具，建成环境“5D”要素的具体测度如下所示：

*土地使用密度，以交通分区作为分析单元，统计每单位面积的居住人口数和工作岗位数，可体现所在交通分区的整体空间活动情况。根据交通分区关键码，将计算得到的人口密度和工作岗位密度与出行调查数据相关联。

*土地使用混合度，统计各个交通分区范围内居住、商业及办公三种不同性质土地使用的空间分布情况，基于信息熵的测度方法如公式 2-1 所示：

$$Land\ use\ mix = - \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i * \ln P_i)}{\ln(n)} \right\} \quad (2-1)$$

其中， P_i 是指土地使用性质 i 占空间尺度内总面积的比重； n 是指不同土地使用性质的种类。信息熵值越低表示土地混合使用情况越差，越接近 1 表明土地混合使用情况越好。本课题的土地混合熵根据五中土地利用种类计算，包括居住用地、工业用地、商业用地、绿化用地以及其他用途的用地类型。

*道路网络设计，用道路网络密度、平均街区地块大小或街道网络连接度指标体现，统计交通分区范围内的道路长度、各个街区地块大小或道路交叉口个数。如果交通分区内部道路网络越长、街区地块越小或交叉口数越多，表明街区网络连接度越好，越适合居民非机动车出行。

*区域可达性，以交通分区作为分析单元，计算家庭住址所在交通分区从空间上到达该区域其他全部交通分区就业工作岗位的机会能力，其值越大表明家庭住址所在地方的区域可达性越好，广义出行成本越低。基于重力模型的区域可达性测度方法如公式 2-2 所示：

$$A_i = \sum_{j=1}^n O_j f(c_{ij}) \quad (2-2)$$

其中， A_i 为交通分区 i 的区域可达性； O_j 为交通分区的就业岗位数； c_{ij} 为从交通分区 i 到交通分区 j 的出行时间、距离或费用； $f(c_{ij})$ 为交通分区 i 和交通分区 j 之间的交通阻抗函数，本课题拟采用常见的指数形式 $f(c_{ij}) = \exp(-\beta c_{ij})$ ，表示出行距离（时间）或费

用增加时函数值降低，即出行受到更多的阻碍。由于不同出行模式在交通分区之间的出行时间差异较大，因此本研究尝试测算基于道路网络和公交网络的区域可达性。

*到公共交通站点的距离，测算出行起讫点到常规公共交通站点和轨道交通站点的最近距离，可作为出行模式选择行为的公共交通服务设施空间影响指标之一。考虑到公共交通站点的距离为街区邻里尺度的建成环境要素，本课题拟采用每一交通小区内的公交覆盖率表征公共交通服务的便利程度。一般而言，距离城市中心区越近，公交服务水平越高。

将测度的交通分区尺度的建成环境“5D”规划要素与通勤活动出行数据进行整合(如图 2-7 所示),作为实证研究的基础。表格 2-2 是对主要建成环境属性做出的解释及统计。

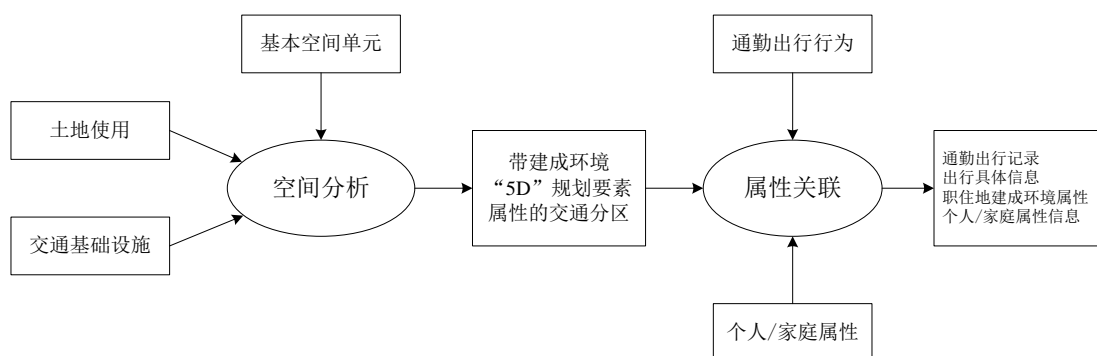


图 2-7 交通分区建成环境要素与通勤出行数据的整合示意图

表格 2-2 主要建成环境属性做出的解释及统计

建成环境变量	变量解释	均值	标准差
居住地建成环境属性			
工作岗位密度	就业岗位个数/交通小区面积；1000 个岗位/km ²	3.10	4.19
路网密度	有机动车道的道路总长度/交通小区面积；km/km ²	3.88	2.76
公交覆盖率	公交站 300 米内总面积/交通小区面积；介于 0-1 之间	0.46	0.33
土地混合熵	交通小区内土地混合使用分布情况；介于 0 和 1 之间	0.71	0.17
工作地建成环境属性			
工作岗位密度	就业岗位个数/交通小区面积；1000 个岗位/km ²	3.75	4.97
路网密度	有机动车道的道路总长度/交通小区面积；km/km ²	4.08	2.74
公交覆盖率	公交站 300 米内总面积/交通小区面积；介于 0-1 之间	0.50	0.33
土地混合熵	交通小区内土地混合使用分布情况；介于 0 和 1 之间	0.73	0.16

3 职住地建成环境对通勤方式选择影响的模型构建

3.1 离散选择模型

将小汽车，步行或自行车，电动车或摩托车及公交车等四类出行选择行为分别作为二元结果变量，用个人属性及职住地建成环境属性作为解释变量分别对四类出行选择变量构建离散选择模型，本课题选用二元 probit 模型，初步分析建成环境属性对四种出行选择行为的影响程度。通勤方式选择影响机制分析的二元 probit 模型如公式 3-1 所示。

$$M_{ij}^* = \beta_0 + \beta_S X_{Si} + \beta_B X_{Bi} + \varepsilon_{ij} \quad (3-1)$$

$$M_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } M_{ij}^* > 0 \\ 0, & \text{if } M_{ij}^* < 0 \end{cases} \quad (3-2)$$

式中 M_{ij}^* 是一个功能函数，表示第 i ($i=1, 2, \dots, n$) 个人选择第 j ($j=1, 2, \dots, 4$) 种出行方式的可能性， β_0 是常数项， X_{Si} 和 X_{Bi} 分别是个人 i 的社会经济属性和职住地的建成环境属性， β_S 和 β_B 分别是其估计参数， ε_i 是误差项，在 probit 模型中被设定为服从标准正太分布，如公式 3-2 所示。

$$\varepsilon_i \sim N(0,1) \quad (3-3)$$

二元 Probit 模型可以表示第 i 个通勤者选择第 j 个出行选择模式的概率为：

$$\begin{aligned} P(M_{ij} = 1) &= P(M_{ij}^* > 0) \\ &= P(\beta_0 + \beta_S X_{Si} + \beta_B X_{Bi} + \varepsilon_{ij} > 0) \\ &= P\{\varepsilon_{ij} > -(\beta_0 + \beta_S X_{Si} + \beta_B X_{Bi})\} \\ &= \Phi\{\beta_0 + \beta_S X_{Si} + \beta_B X_{Bi}\} \end{aligned} \quad (3-4)$$

用极大似然法对二元 probit 模型进行估计，对数似然函数公式 3-5 所示：

$$L(\beta) = \sum_{i=1}^n \{M_{ij} \log P_{ij1} + (1 - M_{ij}) \log P_{ij0}\} \quad (3-5)$$

式中， $\beta = \{\beta_0, \beta_S, \beta_B, \}$ ， P_{ij1} 表示第 i 个人选择第 j 种通勤方式的概率， P_{ij0} 表示第 i 个人不选择第 j 类交通方式的概率。

3.2 多层交叉分类离散选择模型

二元 probit 模型在引入个人的社会经济属性作为控制变量后，可以概括地分析职住

地建成环境属性与通勤选择行为之间的关系，但由于居住在相同交通小区的通勤者往往在通勤行为的选择上有一定的相似性，同样工作地位于相同小区的通勤者也会由于交通小区所具备的某种属性而在出行选择上产生一定的相似性。因而在分析职住地交通小区层面建成环境对出行选择的影响时，要考虑这种由于地理分区单元导致的交通小区之间的空间异质性。多层交叉分类模型则可以同时考虑到居住地交通小区导致的空间异质性和工作地交通小区所导致的空间异质性。居住在交通小区 h ，工作地位于交通小区 w 的个人 i ，选择通勤方式 j 的表达式如公式 3-6 所示：

$$M_{hwj}^* = \alpha_{hwj} + \beta_S X_{Shwij} + \varepsilon_{hwij} \tag{3-6}$$

式中 M_{hwj}^* 是一个功能函数，表示居住在交通小区 h ，工作在交通小区 w 的个人 i ($i=1, 2, \dots, n$) 个人选择第 j ($j=1, 2, \dots, 4$) 种出行方式的可能性，其中 α_{hwj} 是与居住地和居住地相关的截距项，表示的是居住在交通小区 h ，工作在交通小区 w 的通勤者选择 j 中通勤模式的均数， X_{Shwij} 是个人层面的社会经济属性， ε_{hwij} 是在个人围绕均数 α_{hwj} 产生的变动。均数 α_{hwj} 的表达式如公式 3-7 所示：

$$\alpha_{hwj} = \beta_0 + \beta_h X_{Bhj} + \beta_w X_{Bwj} + \xi_{hj} + \zeta_{wj} \tag{3-7}$$

式中 β_0 是总截距， X_{Bhj} 和 X_{Bwj} 分别是交通小区层面居住地和居住地建成环境属性， β_h 和 β_w 分别是相应的参数， ξ_{hj} 和 ζ_{wj} 分别捕捉的是居住地交通小区层面和工作地交通小区层面出行模式选择均数与总均数之间的变异性，分别被假定为均值为 0 的正太分布，如公式 3-8 所示：

$$\begin{aligned} \xi_{hj} &\sim N(0, \sigma_{hj}^2) \\ \zeta_{wj} &\sim N(0, \sigma_{wj}^2) \end{aligned} \tag{3-8}$$

在基于二元 probit 的多层交叉分类模型中，居住在交通小区 h 工作位于交通小区 w 的通勤者 i 选择第 j 个出行选择模式的概率如公式 3-9 所示，多层交叉分类模型使用贝叶斯方法进行估计。

$$\begin{aligned}
 P(M_{ij} = 1) &= P(M_{ij}^* > 0) \\
 &= P(\beta_0 + \beta_h X_{Bhj} + \beta_w X_{Bwj} + \beta_s X_{Shwij} + \xi_{hj} + \zeta_{hj} + \varepsilon_{hwij} > 0) \\
 &= P\left\{ \xi_{hj} + \zeta_{hj} + \varepsilon_{hwij} > -(\beta_0 + \beta_h X_{Bhj} + \beta_w X_{Bwj} + \beta_s X_{Shwij}) \right\} \tag{3-9} \\
 &= P\left\{ \frac{\xi_{hj} + \zeta_{hj} + \varepsilon_{hwij}}{\sqrt{1 + \sigma_{hj}^2 + \sigma_{wj}^2}} > -\left(\frac{\beta_0 + \beta_h X_{Bhj} + \beta_w X_{Bwj} + \beta_s X_{Shwij}}{\sqrt{1 + \sigma_{hj}^2 + \sigma_{wj}^2}} \right) \right\} \\
 &= \Phi\left\{ \frac{\beta_0 + \beta_h X_{Bhj} + \beta_w X_{Bwj} + \beta_s X_{Shwij}}{\sqrt{1 + \sigma_{hj}^2 + \sigma_{wj}^2}} \right\}
 \end{aligned}$$

3.3 半参数回归整合离散选择模型

基于二元 probit 构建的多层交叉分类模型考虑了居住地和工作地交通小区层面的空间异质性，并且能够精确地揭示职住地简称环境属性与通勤选择行为之间的线性关系，然而建成环境属性与出行选择行为之间的关系往往并非简单的线性关系，非线性的影响机制有待探索。因而该课题联合二元 probit 构建一种半参数模型，半参数模型对离散的个人属性变量做线性拟合，对连续的建成环境属性变量做非线性拟合。每一个连续变量的非线性拟合用一个一维的样条函数 $f_k(X_{Bki})$ ($k=1, 2, \dots, K$) 表达，模型的表达式如公式 3-10 所示：

$$M_{ij}^* = \beta_0 + \beta_s X_{Si} + \sum_{k=1}^K f_k(X_{Bki}) + \varepsilon_{ij} \tag{3-10}$$

式中的样条函数 $f_k(X_{Bki})$ 是 q_k 个样条基函数 $b_{kq}(X_{Bki})$ 的线性组合，可以表示为 $f_k(X_{Bki}) = \sum_{q=1}^{q_k} \beta_{kq} b_{kq}(X_{Bki}) = \beta_k B_k(X_{Bki})$ 。根据不同的样条基函数，给定 $b_{kq}(X_{Bki})$ ，与估计的参数 β_k 相乘，求和得到非线性样条函数的估计值并绘制非线性样条函数曲线。样条基函数的选择应该旨在使模型具有优良的数学性能和计算特性，常用的样条基函数有 B-样条基，三项样条基，平面薄板回归样条基等。SimonN^[48] 指出平面薄板样条基函数具有优良的性质，并且能估计出相对光滑的样条函数曲线，本课题选用一维的平面薄板样条基函数估计模型的非线性结果，揭示连续建成环境属性与出行选择行为之间的非线性关系。样条函数的估计结果往往会随着样条基维度设定的增大而具有较大的波动性，一般会在估计模型的时候对模型产生一个约束，因此采用一种带有惩罚项的极大似然估计方法去估计模型结果，也就是求解使公式 3-11 的最大的参数值。

$$l_p(\boldsymbol{\beta})=l(\boldsymbol{\beta})-\frac{1}{2}\sum_{k=1}^K\int\lambda_k f_k''(X_{Bki})dX_{Bki} \quad (3-11)$$

式中 $\frac{1}{2}\sum_{k=1}^K\int\lambda_k f_k''(X_{Bki})dX_{Bki}$ 是参数估计中的惩罚项，使样条函数曲线估计的更加平滑， λ_k 是每一个惩罚项中每一个连续建成环境变量对应的平滑参数，平滑参数越大时表示对应的连续简称环境变量受到的约束越大，因而估计的曲线自由度也越小，曲线相对平滑。参数 $\boldsymbol{\beta}$ 采用信赖区域法估计， λ_k 采取 Marra 和 Radice^[49]提出的一种自动估计方法进行估计，估计参数 $\boldsymbol{\beta}$ 和参数 λ_k 的两个步骤不断迭代直到收敛。

4 职住地建成环境对通勤方式选择影响实证分析

通勤行为不仅与居住地的环境紧密相关，同时受到工作地建成环境属性的影响。本课题在控制个人社会经济属性的前提下，构建三种模型同时分析居住地和工作地的建成环境属性对四种出行方式的影响，通过二元 probit 模型能够初步观测不同变量对几种出行方式所产生的影响；多层交叉分类模型可以同时考虑居住地和工作地 TAZ 的空间异质性对几种通勤方式产生的不同影响；半参数模型可以确定职住地建成环境属性对几种出行方式选择产生的非线性影响。

4.1 离散选择模型结果与分析

表格 4-1 是四类出行方式的二元 probit 模型结果。整体而言，个人社会经济属性对通勤方式选择影响的显著性要高于居住地和工作地的建成环境属性。对于个人社会经济属性，除了年龄>60 岁对公交车的影响不显著之外，其余均在 95% 置信水平下显著。值得注意的是，居住地的建成环境属性对小汽车，步行或自行车，以及电动车或摩托车选择方式的显著性大于工作地简称环境属性；相反，工作地的建成环境属性对公交车出行选择的显著性大于居住地。这可能因为前三类出行方式需要通勤者从出发地自备交通工具，通勤者根据出发地的环境选取舒适的出行方式，因而受到居住地建成环境的影响较大。乘坐公交车则无需自备交通工具，但往往与到达地公交通达性紧密相关，因而工作地建成环境属性对公交方式选择的影响较为显著。

居住地就业岗位密度对小汽车和电动车或摩托车方式选择有负向的影响，而对步行或自行车及公交车的选择有正向的影响，这表明居住在就业岗位密度高的交通小区，通勤者更倾向于选择步行或自行车以及公交车出行，而减少对小汽车、电动车或摩托车的使用，工作地的就业岗位密度的影响则不如居住地显著。居住地道路网络密度对电动车或摩托车出行选择有正向影响，而对步行或自行车及公交车有负向影响，对小汽车出行的正向影响并不显著。这表明居住在道路网络密度较高交通小区的通勤者更倾向于选择电动车或摩托车及小汽车，而降低对步行、自行车及公交车选择的可能性。而工作地较高的道路网络密度只对公交车选择产生显著降低的影响。居住地公交覆盖率对小汽车和步行或自行车产生显著的正向作用，对电动车或摩托车选择起到了负向的降低作用，对是否使用公交车的正向影响并不显著。而工作地的公交覆盖率对小汽车和公交车选择产

生显著的正向影响，对步行或自行车产生显著的负向影响，对电动车或摩托车的正向影响并不显著。这表明居住地和工作地的公交覆盖率对通勤者出行方式选择的影响并不完全一致，居住在公交覆盖率较高的交通小区，通勤者倾向于降低选择电动车或摩托车出行的可能性，而增大其他几种出行方式选择的可能性；而工作地位于公交覆盖率较高的交通小区时，通勤者则倾向于降低步行或自行车出行的可能性。居住地和工作地土地混合使用熵对出行方式显著性的影响相差较大，居住地土地混合利用程度越高时，通勤者显著降低选择电动车或摩托车出行的可能性，增大步行或自行车出行的可能性，而小汽车和公交车增大的可能性并不显著。对于工作地而言，土地混合利用程度高时，步行或自行车出行的可能性显著降低，电动车或摩托车及公交车出行的可能性显著增大，而降低小汽车出行可能性的影响并不显著。

表格 4-1 二元 probit 模型结果

变量	小汽车		步行或自行车		电动车或摩托车		公交车	
	β	Z-value	β	Z-value	β	Z-value	β	Z-value
个人社会经济属性								
截距	-2.132**	-32.670	-0.720**	-14.940	0.671**	15.580	-2.181**	-24.630
年龄 18-30	-0.341**	-14.390	-0.115**	-6.220	0.191**	11.840	0.242**	7.950
年龄>60	-0.599**	-4.840	1.019**	15.070	-0.753**	-11.010	0.043	0.310
性别	0.572**	23.420	-0.375**	-20.920	0.069**	4.350	-0.216**	-7.160
公务员	0.677**	18.250	-0.179**	-3.910	-0.393**	-11.490	-0.321**	-3.410
低收入	-0.627**	-12.060	0.454**	19.270	-0.280**	-12.520	0.164**	4.120
高收入	0.914**	39.940	-0.338**	-13.970	-0.354**	-18.760	-0.136**	-3.280
居住地建成环境属性								
就业岗位密度	-0.016**	-3.920	0.023**	7.360	-0.014**	-4.900	0.017**	3.380
路网密度	0.008	1.160	-0.038**	-6.200	0.027**	5.130	-0.042**	-4.050
公交覆盖率	0.253**	4.370	0.586**	11.070	-0.530**	-12.060	0.083	0.980
土地混合熵	0.110	1.540	0.228**	3.750	-0.223**	-4.330	0.082	0.850
工作地建成环境属性								
就业岗位密度	-0.003	-0.830	-0.002	-0.660	-0.001	-0.450	0.012**	2.910
路网密度	0.003	0.510	0.008	1.360	0.005	0.920	-0.043**	-4.310
公交覆盖率	0.313**	5.410	-0.328**	-6.350	0.024	0.560	0.278**	3.400
土地混合熵	-0.004	-0.060	-0.249**	-3.990	0.107**	1.990	0.423**	4.050
样本	28778							
Pseudo R ²	0.206		0.065		0.041		0.039	

注意：**表示估计值在 95%置信水平下显著；*表示估计值在 90%置信水平下显著。

二元 probit 模型可以初步揭示居住地和在工作地建成环境属性对通勤模式选择的影响机制，但是空间异质性和组内同质性并没有被考虑进去。由于一个交通小区内部的建成环境属性一致，有利于通勤者形成相似的出行选择方式，居住地或工作地在相同交通小区的通勤者的通勤行为有可能表现出组间异质性和组内同质性的特征。多层交叉分类模型可以考虑职住地空间地理分区对出行选择产生的空间异质特性，估计更准确的模型结果。

4.2 多层交叉分类离散选择模型结果与分析

考虑居住地和在工作地交通小区的空间异质性，本课题分别对四类通勤选择构建一种基于二元 probit 的多层交叉分类模型，用空间异质参数衡量空间异质程度，修正二元 probit 模型中过高估计的显著性，得到更精确的模型结果。

表格 4-2 是职住地建成环境属性对小汽车选择的多层交叉分类模型结果，包括参数估计值 β ，标注差 SD，95%置信区间和 90%置信区间。如果 0 没有落入 95%的置信区间范围内则说明参数估计值在该置信水平下显著。对比多层交叉分类模型与二元 probit 模型，个人层面的社会经济属性对小汽车的出行选择的影响程度及显著性相差不大，但是居住地和在工作地交通小区层面的建成环境属性对小汽车选择的影响则与二元 probit 模型相差较大。建成环境属性中只有工作地的公交覆盖率对是否选择小汽车的影响依旧显著。这表明在考虑职住地的空间异质性之后，建成环境属性对小汽车选择影响的显著性程度明显降低，该结果与以往国内外的研究案例一致。从空间异质参数可知，在考虑了建成环境属性的情况下，职住地交通小区的空间异质性仍然是显著的，不同居住地交通小区的变化相对总体均值的差异性较大，而工作地不同交通小区相对于总体均值的变异则不如居住地大。因而得知对于小汽车出行选择而言，居住地交通小区的组间变化要明显大于工作地的组间变化。

表格 4-2 小汽车使用的多层交叉分类模型结果

变量	β	SD	95%CI		90%CI	
			L 2.5%	U 2.5%	L 5%	U 5%
个人层面-社会经济属性						
年龄 18-30	-0.364**	0.026	-0.413	-0.310	-0.405	-0.320
年龄>60	-0.711**	0.131	-0.973	-0.477	-0.934	-0.510

性别	0.623**	0.027	0.573	0.676	0.581	0.668
公务员	0.673**	0.040	0.594	0.749	0.607	0.737
低收入	-0.670**	0.057	-0.783	-0.562	-0.764	-0.577
高收入	0.908**	0.025	0.858	0.958	0.867	0.950
居住地 TAZ 层面-建成环境属性						
就业岗位密度	-0.012	0.010	-0.031	0.007	-0.028	0.004
路网密度	0.026	0.017	-0.007	0.058	-0.002	0.053
公交覆盖率	0.148	0.127	-0.102	0.402	-0.062	0.361
土地混合熵	0.138	0.157	-0.169	0.441	-0.122	0.397
工作地 TAZ 层面-建成环境属性						
就业岗位密度	-0.003	0.006	-0.014	0.008	-0.013	0.007
路网密度	0.001	0.013	-0.024	0.027	-0.020	0.022
公交覆盖率	0.309**	0.099	0.112	0.496	0.142	0.466
土地混合熵	-0.003	0.007	-0.017	0.011	-0.015	0.008
空间异质性参数						
σ_h^2	0.148**	0.021	0.113	0.194	0.118	0.185
σ_w^2	0.037**	0.009	0.022	0.057	0.025	0.053

注意：**表示估计值在 95% 置信水平下显著；*表示估计值在 90% 置信水平下显著。

表格 4-3 是职住地建成环境属性对步行或者自行车选择的多层交叉分类模型结果，与二元 probit 模型结果相比，个人层面的社会经济属性对步行或自行车选择的影响较为相似。年轻人，男性，公务员以及高收入群体会降低步行或自行车通勤的可能性；而老年人和女性群体则更易选择步行或自行车通勤。考虑了交通小区之间的空间异质性和交通小区之内的空间同质性，居住地的建成环境属性从全部显著变为只有就业岗位密度和公交覆盖率显著，工作地建成环境属性中原本显著的土地混合使用熵也不再显著。居住地的就业岗位密度对步行或自行车通勤产生正向影响，表明居住在就业岗位密度较高交通小区的通勤者更趋向于选择步行或自行车上下班；值得关注的是，居住地交通小区公交覆盖率对步行或自行车通勤产生正向影响，而工作地交通小区公交覆盖率较高时则会降低通勤者选择步行或自行车的可能性。这可能因为工作所在交通小区公交覆盖率较高时会导致通勤者选择公交出行而不选择步行或自行车，而居住地较先进的公交系统则不如工作地那样能显著提高公交分担率。和小汽车出行选择模型一致，在控制个人层面的社会经济属性并引入职住地交通小区层面的建成环境属性之后，空间异质参数仍在 95% 置信水平下显著。并且居住交通小区的空间异质性明显要大。空间异质参数表明居住地不同交通小区的均数与总体均值之间的变化较大，而工作地不同交通小区的均数与总体

均数的变异则远不如居住地大。

表格 4-3 步行或自行车模式多层交叉模型结果

变量	β	SD	95%CI		90%CI	
			L 2.5%	U 2.5%	L 5%	U 5%
个人层面-社会经济属性						
年龄 18-30	-0.150**	0.020	-0.188	-0.109	-0.182	-0.116
年龄>60	1.003**	0.069	0.868	1.137	0.889	1.117
性别	-0.413**	0.019	-0.449	-0.374	-0.444	-0.381
公务员	-0.181**	0.049	-0.277	-0.089	-0.264	-0.104
低收入	0.473**	0.026	0.425	0.524	0.431	0.516
高收入	-0.336**	0.026	-0.390	-0.285	-0.379	-0.293
居住地 TAZ 层面-建成环境属性						
就业岗位密度	0.021**	0.008	0.004	0.037	0.007	0.035
路网密度	-0.018	0.015	-0.048	0.012	-0.043	0.007
公交覆盖率	0.489**	0.118	0.255	0.728	0.297	0.686
土地混合熵	0.181	0.142	-0.098	0.451	-0.050	0.410
工作地 TAZ 层面-建成环境属性						
就业岗位密度	-0.003	0.007	-0.016	0.010	-0.014	0.008
路网密度	-0.012	0.014	-0.039	0.015	-0.035	0.010
公交覆盖率	-0.283**	0.106	-0.494	-0.079	-0.456	-0.112
土地混合熵	0.009	0.008	-0.006	0.025	-0.004	0.022
空间异质性参数						
σ_h^2	0.127**	0.016	0.100	0.162	0.104	0.155
σ_w^2	0.067**	0.011	0.049	0.090	0.051	0.087

注意：**表示估计值在 95%置信水平下显著；*表示估计值在 90%置信水平下显著。

表 4-4 是职住地建成环境属性对电动车或摩托车选择的多层交叉分类模型结果，同样个人层面的社会经济属性与二元 probit 模型的估计结果较为相似，所有的属性都具有显著的影响，老年人和低收入群体倾向于选择电动车或摩托车出行，年轻人，男性，公务员和高收入群体则降低选择电动车或摩托车的可能性。而职住地交通小区层面的建成环境属性影响的显著性有所降低。工作地的四个建成环境属性变量都不显著影响电动车或摩托车的选择行为，居住地建成环境属性中道路网络密度和公交覆盖率则仍具有显著的负向影响。表明在考虑了职住地交通小区空间异质性特征之后，居住在道路网络密度或者公交覆盖率较高的交通小区时，通勤者会倾向于降低选择电动车或摩托车出行的可能性。从空间异质参数同样可知，居住地不同交通小区的均数与总体均值之间的变化较大，而工作地不同交通小区的均数与总体均数的变异则远不如居住地大。

表格 4-4 电动车或摩托车模式多层交叉模型结果

变量	β	SD	95%CI		90%CI	
			L 2.5%	U 2.5%	L 5%	U 5%
个人层面-社会经济属性						
年龄 18-30	0.219**	0.017	0.187	0.253	0.192	0.248
年龄>60	-0.734**	0.069	-0.870	-0.597	-0.846	-0.621
性别	0.076**	0.016	0.044	0.110	0.050	0.104
公务员	-0.392**	0.036	-0.464	-0.323	-0.452	-0.335
低收入	-0.289**	0.024	-0.336	-0.242	-0.329	-0.249
高收入	-0.351**	0.020	-0.392	-0.312	-0.385	-0.317
居住地 TAZ 层面-建成环境属性						
就业岗位密度	-0.016*	0.008	-0.032	0.000	-0.029	-0.002
路网密度	0.013	0.014	-0.015	0.040	-0.010	0.035
公交覆盖率	-0.452**	0.107	-0.664	-0.241	-0.628	-0.274
土地混合熵	-0.169	0.129	-0.427	0.079	-0.379	0.042
工作地 TAZ 层面-建成环境属性						
就业岗位密度	0.007	0.005	-0.003	0.017	-0.001	0.015
路网密度	0.010	0.011	-0.011	0.031	-0.008	0.027
公交覆盖率	-0.006	0.082	-0.175	0.151	-0.146	0.125
土地混合熵	-0.006	0.006	-0.018	0.006	-0.016	0.003
空间异质性参数						
σ_h^2	0.116**	0.014	0.092	0.147	0.096	0.142
σ_w^2	0.034**	0.006	0.024	0.048	0.025	0.046

注意：**表示估计值在 95% 置信水平下显著；*表示估计值在 90% 置信水平下显著。

表格 4-5 是职住地建成环境属性对公交车选择的多层交叉分类模型结果，个人层面的社会经济属性与二元 probit 模型估计结果相似，除了老年人其他变量均显著。年轻人，低收入群体倾向于选择公交车通勤；男性，公务员和高收入群体降低选择公交车的可能性。在考虑了空间异质性后，职住地层面五个建成环境属性对是否乘坐公交车存在显著的影响，显著性水平有所下降。居住地的就业岗位密度对选择公交车通勤有显著的正向影响，显著性水平有所下降。居住地的就业岗位密度对选择公交车通勤有显著的正向影响，道路网络密度产生显著的负向影响，表明居住在就业岗位密度较高的交通小区时，通勤者更偏向于选择公交车出行，而居住在道路网络密度较高的交通小区时，通勤者则降低选择公交车出行的可能性。工作地位于道路网络密度较高的交通小区时，通勤者也会降低选择公交车。这可能因为先进的路网系统方便小汽车，电动车及摩托车等交通工具的使用。工作地交通小区的公交覆盖率和土地混合使用熵对公共交通通勤有显著的正向影响，表明工作地位于公交覆盖率高或者土地混合使用程度高的交通小区时，通勤者更倾

向于选择公交车出行。相比于前三类通勤方式，公交车模式的空间异质参数则更大，且工作地的异质性相比于居住地的异质性差距有所减小。这表明对于公交车方式选择而言，空间异质性更加明显，且而工作地不同交通小区的均数与总体均数的变异与居住地的差异不大。

表格 4-5 公交车模式多层交叉模型结果

变量	β	SD	95% CI		90% CI	
			L 2.5%	U 2.5%	L 5%	U 5%
个人层面-社会经济属性						
年龄 18-30	0.326**	0.036	0.257	0.401	0.267	0.388
年龄>60	0.154	0.148	-0.149	0.422	-0.101	0.383
性别	-0.277**	0.034	-0.346	-0.213	-0.335	-0.223
公务员	-0.277**	0.109	-0.494	-0.072	-0.459	-0.103
低收入	0.182**	0.047	0.089	0.271	0.103	0.257
高收入	-0.120**	0.048	-0.215	-0.026	-0.201	-0.042
居住地 TAZ 层面-建成环境属性						
就业岗位密度	0.027*	0.014	-0.002	0.056	0.003	0.050
路网密度	-0.054*	0.029	-0.113	0.002	-0.104	-0.007
公交覆盖率	0.265	0.211	-0.151	0.687	-0.081	0.622
土地混合熵	0.000	0.242	-0.471	0.474	-0.395	0.398
工作地 TAZ 层面-建成环境属性						
就业岗位密度	-0.007	0.010	-0.027	0.013	-0.023	0.010
路网密度	-0.055**	0.023	-0.099	-0.006	-0.093	-0.015
公交覆盖率	0.460**	0.173	0.110	0.782	0.168	0.728
土地混合熵	0.023*	0.012	-0.001	0.048	0.003	0.043
空间异质性参数						
σ_h^2	0.339**	0.053	0.251	0.462	0.264	0.436
σ_w^2	0.135**	0.027	0.092	0.196	0.098	0.185

表格 4-6 是是职住地建成环境属性对四类通勤模式选择的多层交叉分类模型结果对比。可知在考虑空间异质性后，居住地就业岗位密度较高时会降低小汽车，电动车或摩托车的选择，而增大步行、自行车和公交车等绿色的通勤方式，可见高的就业岗位密度对绿色出行是较为友好的。居住地路网密度较高时会降低选择步行、自行车和公交车等绿色方式的可能性，而增大选择小汽车，电动车或摩托车等较为灵活机动的出行方式的可能性，表明道路密度较高时对灵活的机动车的出行较为友好。居住地公交覆盖率较高时会降低选择电动车或摩托车通勤的可能性，而增大其他三类出行选择的可能性，这表明中山市居住地的公交覆盖率为电动车和摩托车的使用起到了削减的作用，而未能降低

小汽车，步行和自行车的使用，这可能与中山市公交分布特征有关。居住地的土地混合使用程度对几类出行方式的影响都不显著，这与中山市的城市规划形态有关，中山市划分为城镇发展区、城乡协调区、生态控制区三类，构建统一的城乡空间发展与管理平台，土地利用多元化，全市经济得到统筹发展。

工作地的建成环境属性中，公交覆盖率对几种通勤模式的影响较为显著，工作地所在交通小区公交覆盖率较高时，通勤者会增加选择小汽车和公交车的可能性，而减少选择步行、自行车、电动车和摩托车等支持适宜短距离出行的方式。和居住地一致的是，工作地路网密度较高时，通勤者降低对步行、自行车和公交车等绿色交通方式的选择，而更倾向于选择小汽车、电动车或摩托车等灵活机动的出行方式。与道路网络密度相反的是，工作地土地混合使用程度较高时，通勤者减少选择小汽车，电动车或摩托车等灵活机动的出行方式，而倾向于选择步行，电动车和公交车等较为绿色的出行方式。

从空间异质参数可知，在控制个人层面的社会经济属性并且引入建成环境属性之后，空间异质性还是十分显著，也就是职住地交通小区的组水平均值相对于总体均值仍存在较大的变化。整体而言居住地交通小区层面的变化比居住地的要大，而公交车选择行为存在的空间异质性比其他三类出行行为选择要大。

表格 4-6 四类通勤方式的多层交叉分类模型结果对比

变量	小汽车	步行或自行车	电动车或摩托车	公交车
个人层面-社会经济属性				
年龄 18-30	-0.364**	-0.150**	0.219**	0.326**
年龄>60	-0.711**	1.003**	-0.734**	0.154
性别	0.623**	-0.413**	0.076**	-0.277**
公务员	0.673**	-0.181**	-0.392**	-0.277**
低收入	-0.670**	0.473**	-0.289**	0.182**
高收入	0.908**	-0.336**	-0.351**	-0.120**
居住地 TAZ 层面-建成环境属性				
就业岗位密度	-0.012	0.021**	-0.016*	0.027*
路网密度	0.026	-0.018	0.013	-0.054*
公交覆盖率	0.148	0.489**	-0.452**	0.265
土地混合熵	0.138	0.181	-0.169	0.000
工作地 TAZ 层面-建成环境属性				
就业岗位密度	-0.003	-0.003	0.007	-0.007
路网密度	0.001	-0.012	0.010	-0.055**
公交覆盖率	0.309**	-0.283**	-0.006	0.460**

土地混合熵	-0.003	0.009	-0.006	0.023*
空间异质性参数				
σ_h^2	0.148**	0.127**	0.116**	0.339**
σ_w^2	0.037**	0.067**	0.034**	0.135**

4.3 半参数回归整合离散选择模型结果与分析

以往的线性模型仅仅揭示了连续的建成环境属性变量与出行方式变量之间的线性关系，而不同范围的建成环境属性往往对结果变量的影响程度是不同的，因此本课题基于二元 probit 模型引入一种非线性的非参数模型去衡量连续建成环境属性对出通勤方式选择所产生的非线性影响。半参数模型包括两部分：线性的参数模型部分及非线性的非参数模型部分。线性的参数部分用来衡量二元社会经济属性对出行行为的影响程度，非线性部分用来衡量连续变化的建成环境属性对出行行为的影响程度。统计量 Z 值用来衡量线性变化系数的显著性，edf 用来衡量不同连续变量非线性变化的程度，统计量 Chi.sq 用来衡量 edf 的显著性。表格 4-7 是半参数模型的线性部分结果，系数大小及显著性水平与二元 probit 和交叉分类模型均较为相似。

表格 4-7 半参数模型线性部分结果

变量	小汽车		步行或自行车		电动车或摩托车		公交车	
	γ	Z-value	γ	Z-value	γ	Z-value	γ	Z-value
截距	-1.823**	-71.168	-0.695**	-40.843	0.436**	28.235	-1.937**	-62.670
年龄 18-30	-0.346**	-14.433	-0.116**	-6.195	0.193**	11.873	0.250**	7.999
年龄>60	-0.604**	-4.776	1.005**	14.720	-0.757**	-10.998	0.091**	0.645
性别	0.586**	23.665	-0.380**	-20.965	0.068**	4.256	-0.232	-7.504
公务员	0.683**	18.178	-0.198**	-4.252	-0.391**	-11.355	-0.283**	-2.987
低收入	-0.630**	-11.892	0.451**	18.719	-0.275**	-12.086	0.140**	3.422
高收入	0.897**	38.063	-0.349**	-13.992	-0.336**	-17.389	-0.118**	-2.744

表格 4-8 是四类通勤方式非线性部分的模型结果。居住地建成环境属性变量的 edf 值大多在 8 以上，而工作地建成环境属性变量的 edf 有不少接近于 1，表明该连续变量对特定出行选择的影响程度在变量范围之内基本一致，趋于线性关系。edf 表明职住地建成环境属性与通勤者出行方式选择之间具有较强的非线性关系，而居住地的非线性关系要更强。通过 Chi.sq 值可知除了工作地的就业岗位密度和土地混合熵对小汽车选择的影响不显著之外，其他职住地建成环境属性对四类通勤模式均存在显著的非线性影响。

表格 4-8 半参数模型非线性部分结果

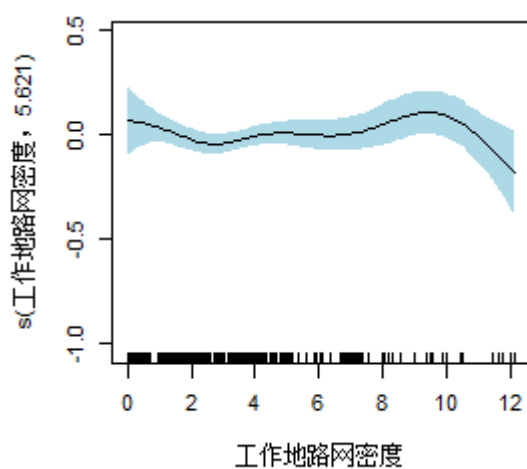
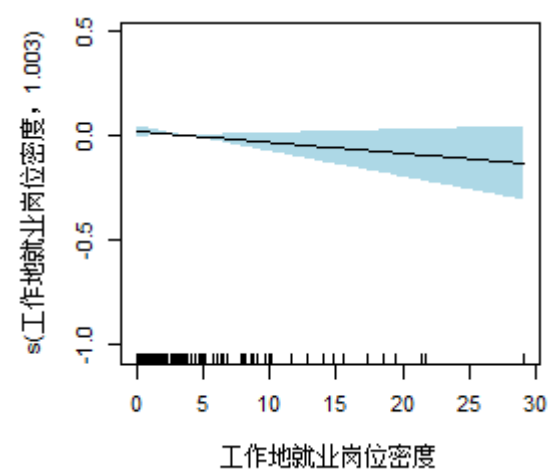
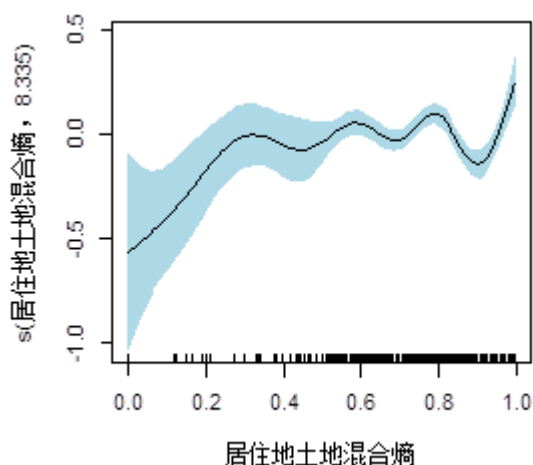
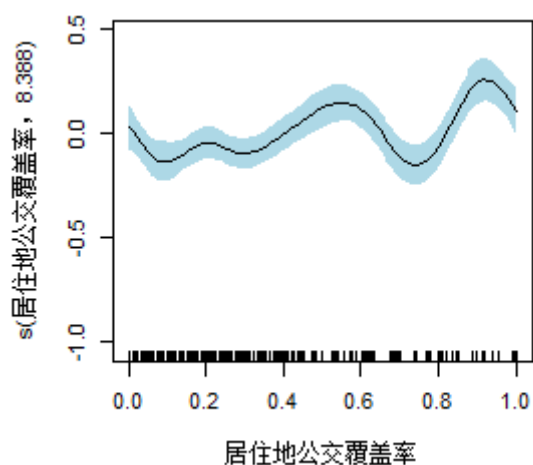
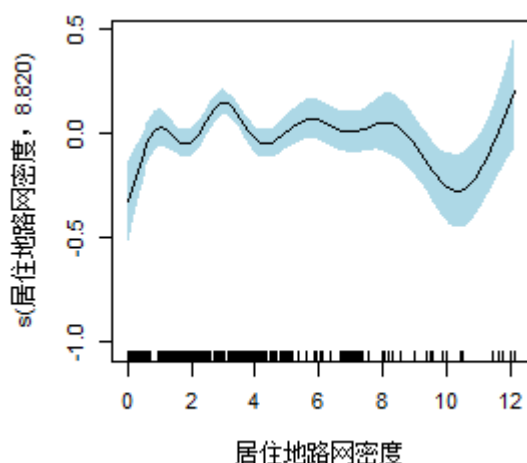
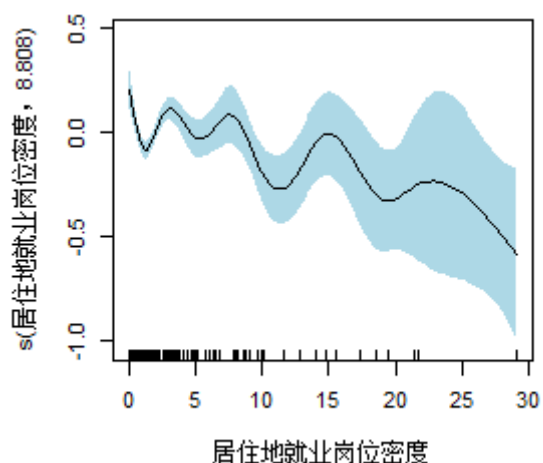
变量	小汽车		步行或自行车		电动车或摩托车		公交车	
	edf	Chi.sq	edf	Chi.sq	edf	Chi.sq	edf	Chi.sq
居住地建成环境属性								
就业岗位密度	8.808**	66.051	8.755**	133.835	8.317**	77.280	7.353**	38.625
路网密度	8.820**	44.271	8.796**	65.032	6.585**	40.590	8.321**	79.137
公交覆盖率	8.388**	48.951	8.401**	68.768	8.386**	112.290	2.831**	13.364
土地混合熵	8.335**	43.706	8.608**	34.649	8.626**	39.250	7.839**	33.558
工作地建成环境属性								
就业岗位密度	1.003	2.319	5.736**	41.948	1.018**	10.080	8.797**	66.738
路网密度	5.621*	12.379	2.319*	7.918	6.719**	34.180	1.002**	8.512
公交覆盖率	7.420**	49.417	8.626**	72.417	8.723**	44.170	1.005**	6.703
土地混合熵	3.560	6.029	7.850**	34.288	8.330**	30.360	5.526**	18.730

图 4-1 是建成环境属性对小汽车选择的非线性函数曲线，黑色线条是根据估计参数计算的函数值，蓝色区间是根据估计值和方差计算出非线性函数的 95% 置信区间。不同于二元 probit 模型和多层交叉分类模型估计的结果，工作地就业岗位密度对小汽车选择的影响并非一直显著为负，而是一个波动的状态。在三个范围内选择小汽车的可能性随着居住地就业岗位密度的变大而下降，当大于 15 时，就业岗位密度越高，选择小汽车的可能性则越大。而居住地路网密度对小汽车选择的产生的影响也是在正负之间来回波动，当小于 1.5 或者大于 10.5 时，路网密度对选择小汽车的概率保持正向的增大作用。

从非线性函数曲线得知，职住地建成环境属性对小汽车选择产生的影响程度是非线性的，不能一概而论，需要考虑特定范围内建成环境属性对是否选择小汽车出行所产生的影响。居住地公交覆盖率对小汽车使用的可能性有三个降低的阶段，降低程度最明显的是公交覆盖率集中在 0.6-0.75 或者大于 0.95 的范围内，这与二元 probit 和多层分类的结果不同，说明公交覆盖率并非不能降低小汽车的选择，只是当公交覆盖率高至一定程度才能降低小汽车的使用。除了偶尔存在较小的负向作用，越高的居住地土地混合程度会增大通勤者选择小汽车的可能性。

就工作地建成环境属性而言，就业岗位密度对小汽车的负向作用近似线性关系，从 95% 置信区间可知这一影响并不显著；工作地路网密度在大于 10 时对小汽车选择的概率产生负向作用；当大于 0.4 时，随着公交覆盖率的增大通勤者选择小汽车的可能性有一个波动的缓慢上涨趋势，该范围内与多层分类模型结果一致，而在 0.1-0.2 时，公交

覆盖率越高则选择小汽车的可能性降低；土地混合使用熵对小汽车选择的可能性无明显的增减作用，并且从置信区间可以看出非线性函数的置信区间基本都越过 0，土地混合熵的影响不显著。



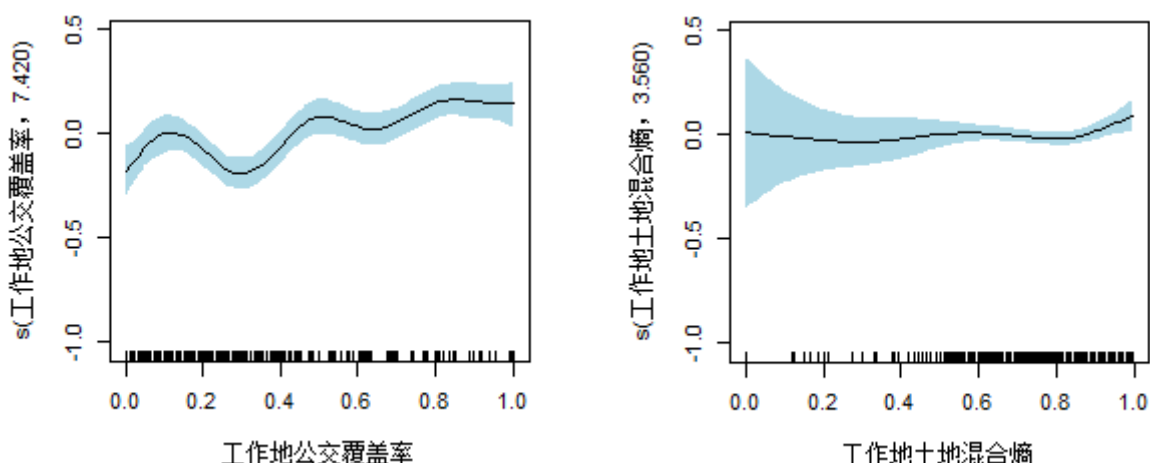
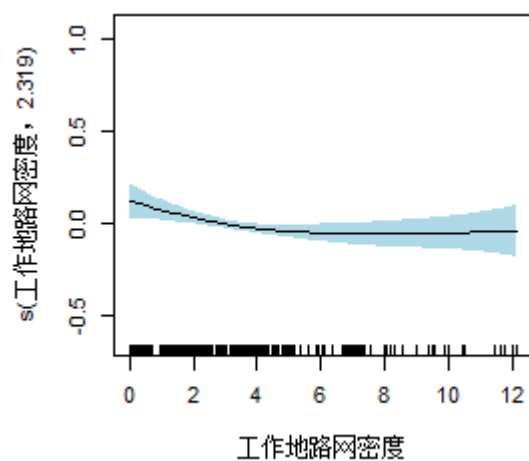
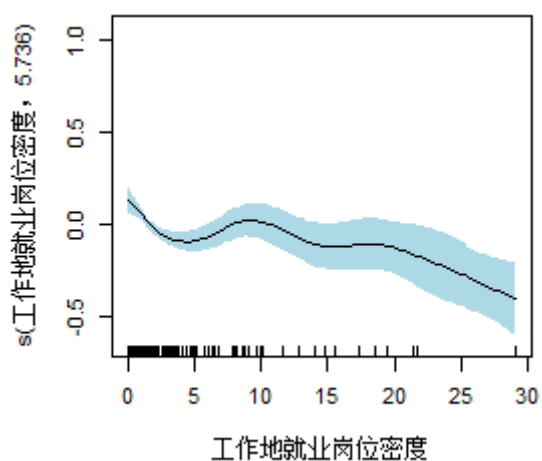
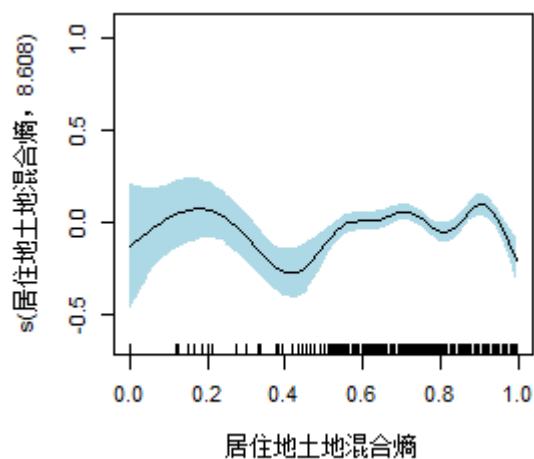
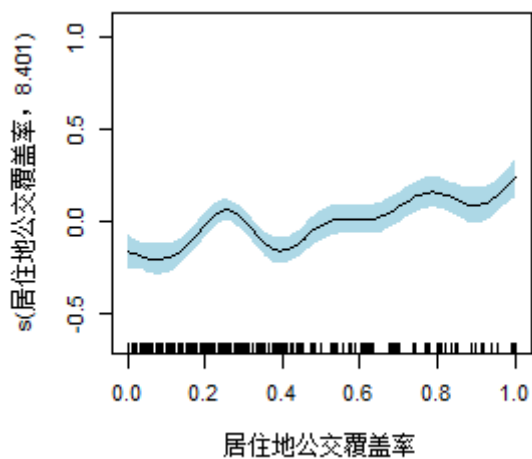
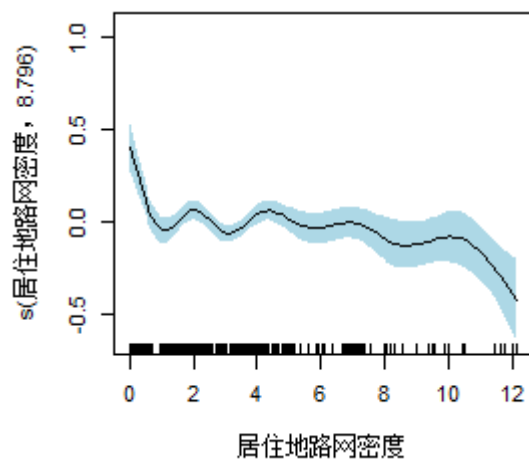
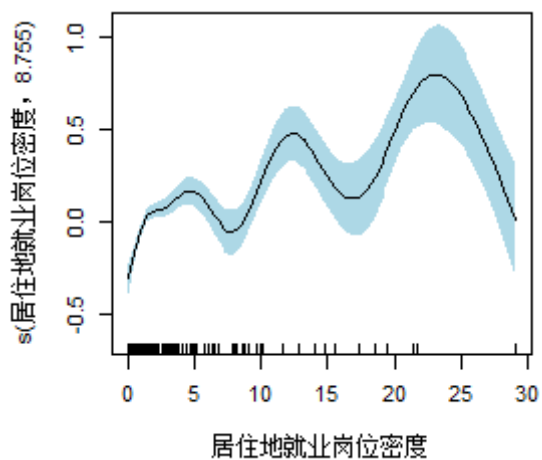


图 4-1 小汽车非线性函数曲线

图 4-2 是建成环境属性对步行或自行车选择的非线性函数曲线，职住地八个建成环境属性变量对步行或自行车选择行为产生的非线性影响都显著地不为 0，从 edf 值和非线性函数曲线均可得知居住地建成环境属性对步行和自行车选择产生的非线性影响程度大于工作地。对于居住地建成环境属性而言，就业岗位密度对步行或自行车通勤方式产生一个波动的非线性影响，当密度小于 5 或大于 22 时，就业岗位密度对步行和自行车使用起到负向作用，而在中间部分区间则产生正向作用；道路网络密度对通勤者选择步行或自行车的可能性产生一个波动的负向影响，当密度小于 1 时降低的程度最大。公交覆盖率在 0.25 至 0.4 时，对选择步行或自行车的可能性产生降低的作用，其余阶段随着公交覆盖率的增大均增加步行或自行车通勤的可能性。可能是因为公交覆盖率非常高的交通小区往往伴随着拥堵的道路交通，反而会促使通勤者选择步行或自行车这种较为灵活的交通方式。在 0.2 至 0.4 或大于 0.9 时，随着土地混合程度的增大，通勤者选择步行或自行车通勤的可能性显著降低。

工作地建成环境属性的非线性不如居住地强，其中就业岗位密度和道路网络密度对步行或自行车通勤选择基本保持着负向的影响，但程度有所变化。这表明随着通勤者工作地就业岗位密度或道路网络密度的增大，选择步行或自行车通勤的可能性会显著降低。在 0.4 至 0.9 范围内时，随着公交覆盖率的增大，步行或自行车通勤的概率会降低，0.9 至 1.0 时，随着公交覆盖率的增大，通勤者选择步行或自行车的概率急剧上升。通勤者选择步行或自行车的可能性先随工作地土地混合使用程度的增大而减小，再显著增大，紧接着又缓慢减小。可知工作地土地混合使用程度过高或者过低都会降低步行或自行车

出行的可能性，而维持在一定的范围则可以促进选择步行或自行车通勤。



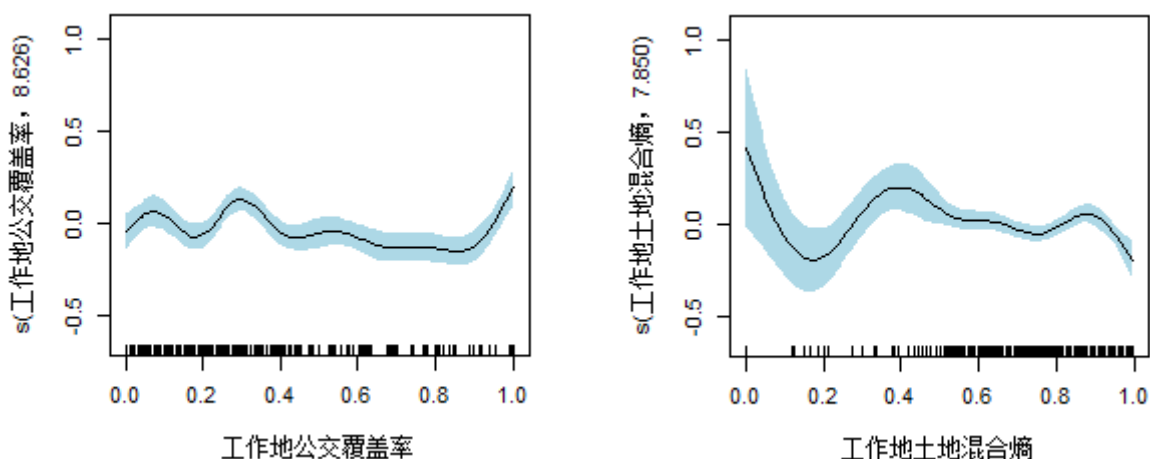
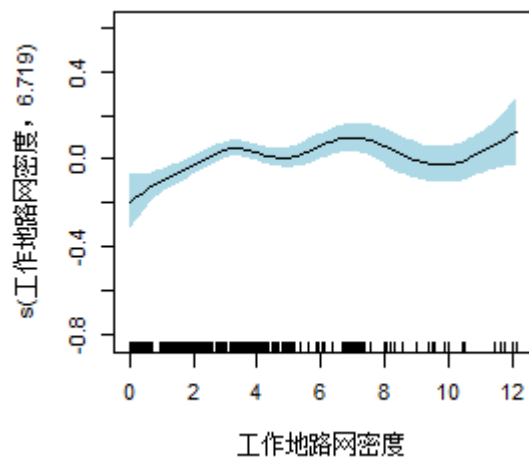
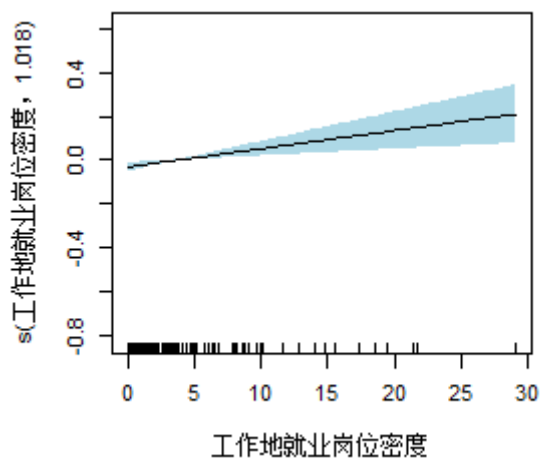
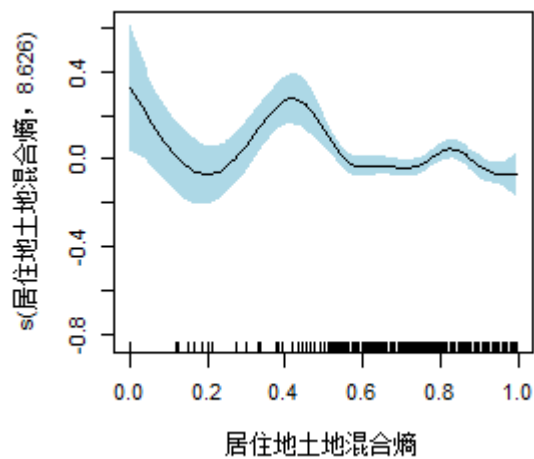
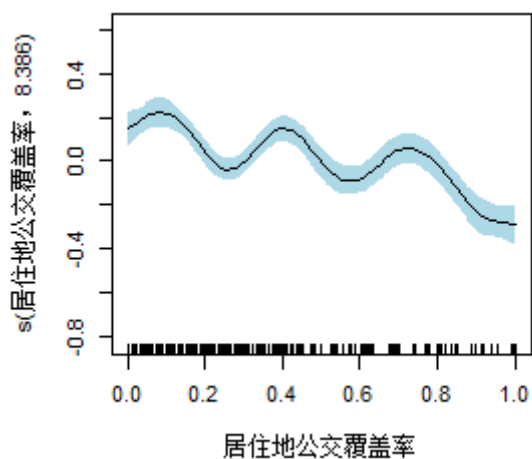
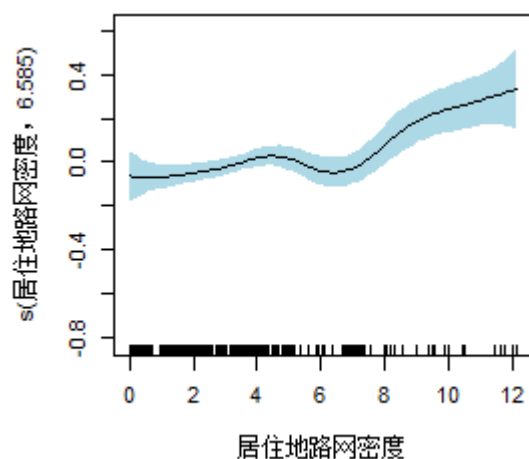
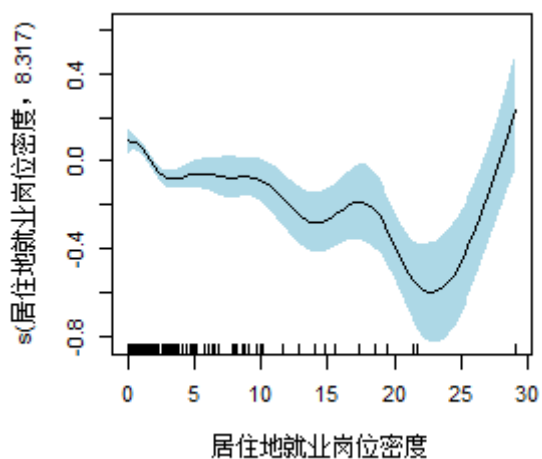


图 4-2 步行或自行车非线性结果图

图 4-3 是建成环境属性对电动车或摩托车选择行为影响的非线性函数曲线，从置信区间可知，职住地八个建成环境属性变量对电动车或摩托车选择行为产生的非线性影响都显著地不为 0，从 edf 值和非线性函数曲线均可得知居住地建成环境属性对步行和自行车选择产生的非线性影响程度大于工作地。分析居住地建成属性，通勤者选择电动车或摩托车的可能性先随着就业岗位密度的增大而波动减小，随后骤增；通勤者选择电动车或摩托车的可能性则随着居住地路网密度的增大而一直处于上升的状态；公交覆盖率对通勤者选择电动车或摩托车的可能性则产生一个往复波动的增减，但整体呈负向的降低作用。通勤者选择电动车或摩托车的可能性先随着居住地土地混合熵的增大而减小，最后增加再保持不变。

分析工作地建成环境属性，就业岗位密度对通勤者选择电动车或摩托车的可能性有一个线性的增大作用，从置信区间可以看出这个正向作用时显著的。通勤者选择电动车或摩托车的可能性随着工作地路网密度的增大呈缓慢增大的趋势。公交覆盖率则对通勤者选择电动车或摩托车的可能性产生一个不太显著的往复增减的影响，整体影响程度较低。工作地土地混合熵对通勤者选择电动车或摩托车的可能性先产生一个显著的正向影响，随后减小再保持不变，这与居住地的土地混合使用熵对通勤者选择电动车或摩托车可能性的影响恰好相反。



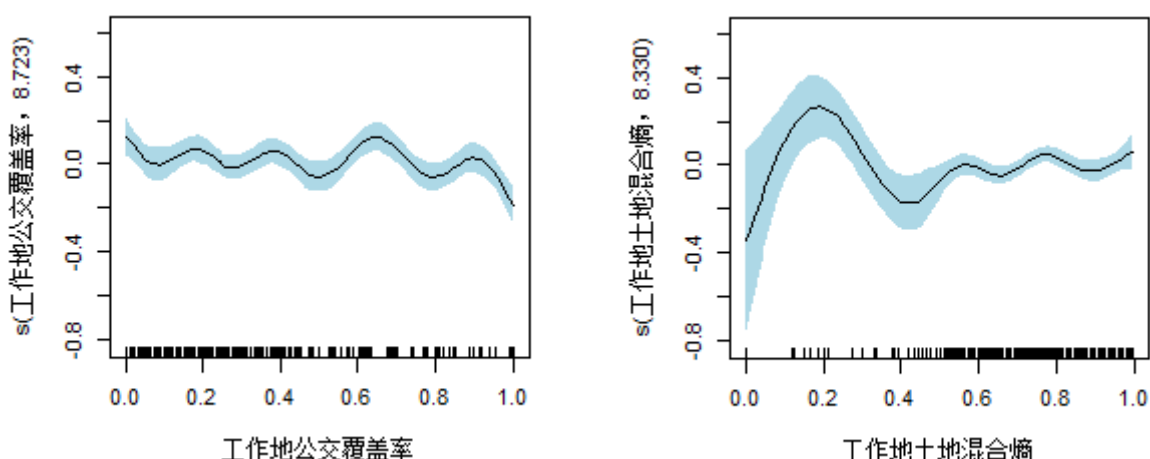
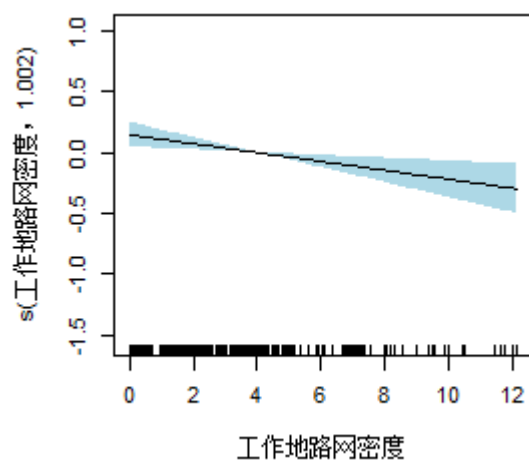
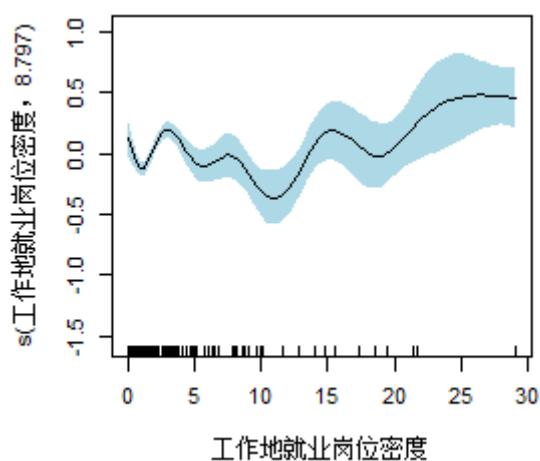
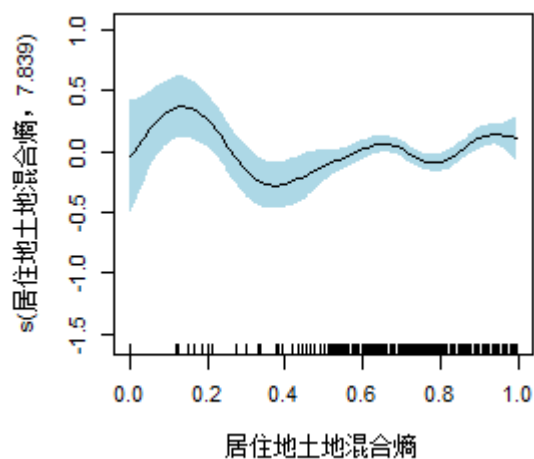
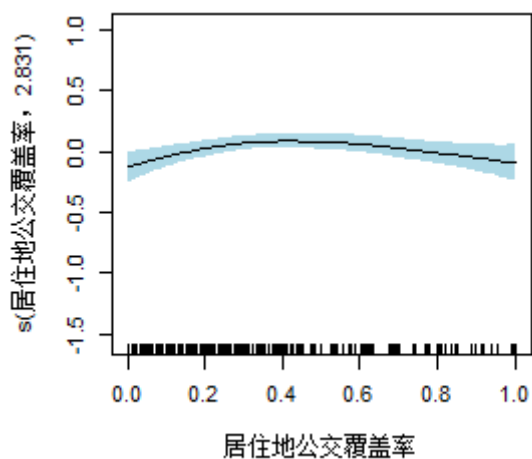
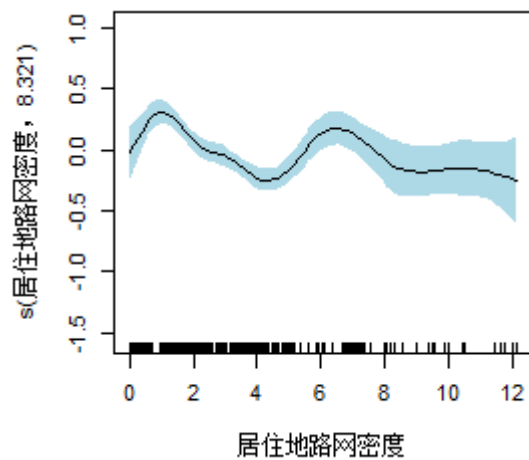
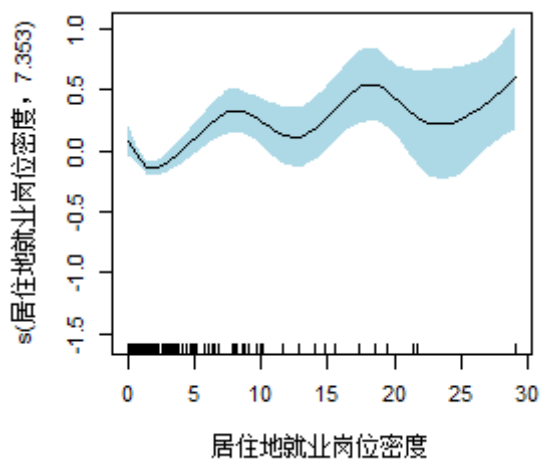


图 4-3 电动车或摩托车非线性结果图

图 4-4 是建成环境属性对公交车选择行为影响的非线性函数曲线,从置信区间可知,职住地八个建成环境属性变量对公交车选择行为产生的非线性影响都显著地不为 0,从 edf 值和非线性函数曲线均可得知居住地建成环境属性对步行和自行车选择产生的非线性影响程度大于工作地。分析居住地建成属性,通勤者选择公交车的可能性随着就业岗位密度的增大在增大和降低之间往复变化,相比于就业岗位密度最小的交通小区,密度最大的交通小区的通勤者仍有较大的可能性乘坐公交;通勤者选择公交车的可能性则随着居住地路网密度的增大在增大和降低之间往复变化,但整体呈下降趋势;公交覆盖率对通勤者选择公交车的可能性先产生一个缓慢的增加作用,再产生一个缓慢的降低作用。通勤者选择公交车的可能性先随着居住地土地混合熵的增大而增大,最后减小再保持基本不变。

分析工作地建成环境属性,就业岗位密度对通勤者选择公交车的可能性有一个往复波动的降低作用,之后再有一个往复的增大作用。也就是说当在 10 以下时,通勤者选择公交车的可能性随着工作地就业岗位密度的增大而减小;当在 10 以上时,通勤者选择公交车的可能性随着工作地就业岗位密度的增大而增大。工作地路网密度和公交覆盖率对通勤者选择公交车的概率产生线性的影响,居住在工作地路网密度较高的交通小区时,通勤者会降低选择公交车出行选择的可能性,居住在工作地公交覆盖率较高的交通小区时,通勤者会增大选择公交车出行选择的可能性。工作地土地混合熵对通勤者选择公交车的可能性则先产生一个显著的正向影响,随后再保持基本不变,这表明工作地土地混合熵在 0.4 以下时,随着五中土地混合使用程度增大时,通勤者更倾向于选择公交

车出行。



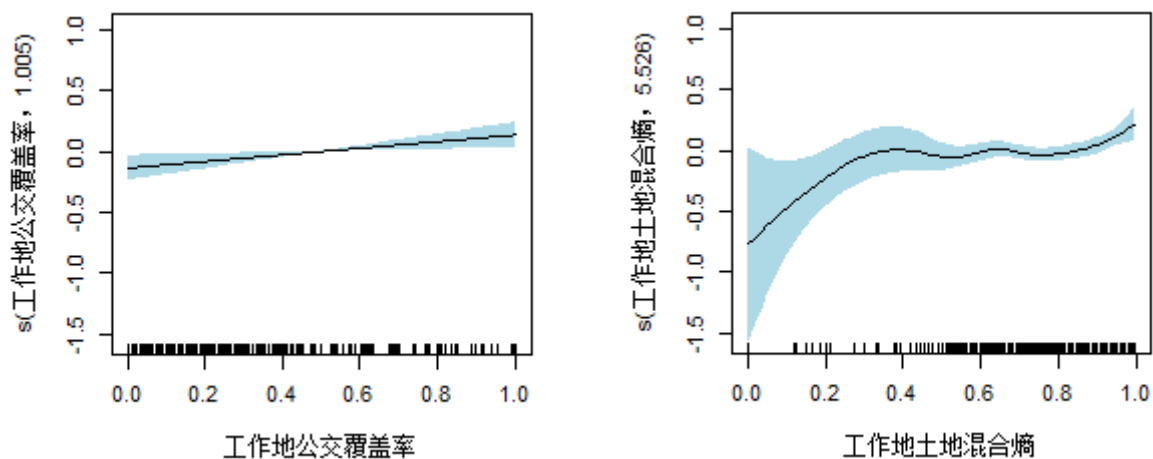


图 4-4 公交车非线性结果图

结论

本课题以中山市交通调查数据为实证展开分析，通过构建多层交叉分类离散选择模型和半参数回归整合离散选择模型，验证空间异质性和非线性关系的存在，准确揭示居住地和工作地建成环境对通勤出行方式选择的空間异质性影响和非线性关系。整体而言，个人社会经济属性对通勤方式选择影响的显著性要高于居住地和工作地的建成环境属性。值得注意的是，居住地的建成环境属性对小汽车，步行或自行车，以及电动车或摩托车选择方式的显著性大于工作地简称环境属性；相反，工作地的建成环境属性对公交车出行选择的显著性大于居住地。

考虑居住地和工作地交通小区的空间异质性，本课题分别对四类通勤选择构建一种基于二元 probit 的多层交叉分类模型，用空间异质参数衡量空间异质程度，修正二元 probit 模型中过高估计的显著性，得到更精确的模型结果。对比多层交叉分类模型与二元 probit 模型，个人层面的社会经济属性对几类通勤选择行为的影响程度及显著性相差不大，但是居住地和工作地交通小区层面的建成环境属性的影响则与二元 probit 模型相差较大。从空间异质参数可知，在考虑了建成环境属性的情况下，职住地交通小区的空间异质性仍然是显著的，不同居住地交通小区的变化相对总体均值的差异性较大，而工作地不同交通小区相对于总体均值的变异则不如居住地大。因而得知对于几类出行选择行为而言，居住地交通小区的组间变化要明显大于工作地的组间变化。

本课题基于二元 probit 模型整合一种非线性的非参数模型去衡量连续建成环境属性对出通勤方式选择所产生的非线性影响。半参数模型包括线性的参数模型部分及非线性的非参数模型两部分。线性的参数部分用来衡量二元社会经济属性对出行行为的影响程度，非线性部分用来衡量连续变化的建成环境属性对出行行为的影响程度。线性部分系数大小及显著性水平与二元 probit 和交叉分类模型均较为相似，非线性部分的模型结果表明职住地建成环境属性与通勤者出行方式选择之间具有较强的非线性关系，而居住地的非线性关系要更强。

通过考虑空间异质性及非线性关系，课题更准确地揭示了职住地建成环境属性与通勤选择行为之间的影响机制，结果表明职住地的就业岗位密度、道路网络密度及公交覆盖率等建成环境属性对几类通勤选择行为的影响都较为显著，整体而言居住地就业岗位

密度对小汽车的选择有一个非线性的负向作用，而对步行、自行车和公交车等绿色出行方式的选择产生正向的促进作用；工作地的就业岗位密度对小汽车、步行和自行车的使用产生负向作用，而电动车、摩托车和公交车的使用则产生正向的作用。道路网络密度对小汽车、电动车和摩托车的使用整体有一个非线性的促进作用，而对公交车的使用有一个降低的作用。居住地的公交覆盖程度显著地降低了电动车或摩托车的使用，工作地的公交覆盖程度显著地增加了公交车的分担率，总地来说，中山市公交覆盖率目前对绿色出行方式产生的影响程度还不理想，这可能因为中山市便捷的路网有利于通勤者通过自有交通工具出行。课题结果表明交通和土地规划者应该考虑建成环境与出行选择行为之间的影响机制，从根源上对土地利用和交通设施的分配进行合理的规划，为科学制定交通与土地使用规划方案或出行需求管理策略提供关键理论支撑。

参考文献

- [1]顾朝林, 谭纵波, 韩春强, 等. (2009). 气候变化与低碳城市规划. 南京: 东南大学出版社.
- [2]陈飞, 诸大建. (2009). 低碳城市研究的内涵、模型与目标策略确定. 城市规划学刊, (4): 7-13.
- [3]叶玉瑶, 张虹鸥, 许学强, 等. (2012). 面向低碳交通的城市空间结构: 理论、模式与案例. 城市规划学刊, 2012, (5): 37-43.
- [4]刘志林, 秦波. (2013). 城市形态与低碳城市: 研究进展与规划策略. 国际城市规划, 28(2): 4-11.
- [5] International Energy Agency. (2009). Transport, Energy and CO₂: Moving Toward Sustainability. IEA Paris.
- [6] Frank L D. (2000). Land use and transportation interaction: implications on public health and quality of life. *Journal of Planning Education and Research*, 20(6): 6-22.
- [7]马静, 柴彦威, 刘志林. (2011). 基于居民出行行为的北京市交通碳排放影响机理. 地理学报, 66(8): 1023-1032.
- [8]姚胜永, 潘海啸. (2009). 基于交通能耗的城市空间和交通模式宏观分析及对我国城市发展的启示. 城市规划学刊, (3): 46-52.
- [9]赵鹏军. (2010). 城市形态对交通能源消耗及温室气体排放的影响——以北京为例. 北京大学博士学位论文: 101-188.
- [10] Cervero R, Murakami J. (2010). Effects of built environments on vehicle miles traveled: evidence from 370 US urbanized areas. *Environment and Planning A*, 42(2): 400-418.
- [11] Ewing R, Bartholomew K, Winkelmann S, et al. (2008). *Growing Cooler: The Evidence on Urban Development and Climate Change*. Urban Land Institute: Washington, DC, United States.
- [12] Brownstone D, Golob T F. (2009). The impact of residential density on vehicle usage and energy consumption. *Journal of Urban Economics*, 65(1): 91-98.
- [13] Hong J, Shen Q, Zhang L. (2014). How do built-environment factors affect travel behavior? A spatial analysis at different geographic scales. *Transportation*, 41(3): 419-440.
- [14] Hong J, Shen Q. (2013). Residential density and transportation emissions: examining the connection by addressing spatial autocorrelation and self-selection. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, (22): 75-79.
- [15]柴彦威, 肖作鹏, 刘志林. (2012). 居民家庭日常出行碳排放的发生机制与调控策略——以北京市为例. 地理研究, 31(2): 334-344.
- [16] Hong J, Goodchild A. (2014). Land use policies and transport emissions: modeling the impact of trip speed, vehicle characteristics and residential location. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, (26): 47-51.

- [17] Yang J, Ferreira J. (2009). Informing the public of transportation-land use connections. *Transportation Research Part C*, 17(1): 27-37.
- [18] Yang J. (2008). Policy implication of excess commuting: examining the impacts of changes in US metropolitan spatial structure. *Urban Studies*, 45(2): 391-405.
- [19] Cervero R. (2002). Built environments and mode choice: toward a normative framework. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 7(4): 265-284.
- [20] Currie G. (2006). Bus transit oriented development-strengths and challenges relative to rail. *Journal of Public Transportation*, 9(4): 1-20.
- [21] Lund H. (2006). Reasons for living in a transit-oriented development, and associated transit use. *Journal of the American Planning Association*, 72(3): 357-366.
- [22] Guerra E, Cervero R. (2011). Cost of a ride: the effects of densities on fixed-guideway transit ridership and costs. *Journal of the American Planning Association*, 77(3): 267-290.
- [23] Handy S, Boarnet M G, Ewing R, et al. (2002). How the built environment affects physical activity: views from urban planning. *American Journal of Preventive Medicine*, 23(2S): 64-73.
- [24] Boarnet M G. (2011). A broader context for land use and travel behavior, and a research agenda. *Journal of the American Planning Association*, 77(3): 197-213.
- [25] Zhang M. (2004). The role of land use in travel mode choice: evidence from Boston and Hong Kong. *Journal of the American Planning Association*, 70(3): 344-360.
- [26] Maat K, Wee B, Stead D. (2005). Land use and travel behavior: expected effects from the perspective of utility theory and activity-based theories. *Environment and Planning B*, 32(1): 33-46.
- [27] Scheiner J, Rau C H. (2007). Travel mode choice: affected by objective or subjective determinants? *Transportation*, 34(4): 487-511.
- [28] 韦亚平, 潘聪林. (2012). 大城市街区土地利用特征与居民通勤方式研究——以杭州城西为例. *城市规划*, 36(3): 76-89.
- [29] Crane R, Crepeau R. (1998). Does neighborhood design influence travel? A behavioral analysis of travel diary and GIS data. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 3(4): 225-238.
- [30] Zegras P C. (2004). Influence of land use on travel behavior in Santiago, Chile. *Journal of the Transportation Research Board*, 1898: 175-182.
- [31] Cervero R, Sarmiento O L, Jacoby E, et al. (2009). Influences of built environments on walking and cycling: lessons from Bogota. *International Journal of Sustainable Transportation*, 3(4): 203-226.
- [32] Reilly M, Landis J. (2002). The influence of built-form and land use on mode choice: evidence from the 1996 Bay area travel survey. *Transportation Center Research Paper*. University of California, Berkeley.
- [33] Ewing R, Cervero R. (2010). Travel and the built environment: a meta-analysis. *Journal of the American Planning Association*, 76(3): 265-294.

- [34] Coogan M A, Adler T, Karash K H. (2012). The paths from walk preference to walk behavior: applying latent factors in structural equation modeling. *Journal of Transport and Land Use*, 5(3): 68-82.
- [35] Fukuda D, Yai T. (2010). Semiparametric specification of the utility function in a travel mode choice model. *Transportation*, 37(2):221-238.
- [36] Zhang L, Hong J, Nari A, et al. (2012). How built environment affects travel behavior: a comparative analysis of the connections between land use and vehicle miles traveled in US cities. *Journal of Transport and Land use*, 5(3): 40-52.
- [37] Shuttleworth I, Gould M. (2010). Distance between home and work: a multilevel analysis of individual workers, neighbourhoods, and employment sites in Northern Ireland. *Environment and Planning A*, 42(5): 1221-1238.
- [38] Manaugh K, Miranda-Moreno L F, El-Geneidy A M. (2010). The effect of neighbourhood characteristics, accessibility, home-work location, and demographics on commuting distances. *Transportation*, 37(4): 627-646.
- [39] Maat K, Timmermans H. (2009). A causal model relating urban form with daily travel distance through activity/travel decisions. *Transportation Planning and Technology*, 32(2): 115-134.
- [40]冯健,周一星. (2004). 郊区化进程中北京城市内部迁居及相关空间行为——基于千份问卷调查的分析. *地理研究*, 23(2): 227-241.
- [41]刘志林, 张艳, 柴彦威, 等. (2009). 中国大城市职住分离现象及其特征——以北京市为例. *城市发展研究*, 16(9): 110-117.
- [42]孙斌栋, 李南菲, 宋杰洁, 等. (2010). 职住平衡对通勤交通的影响分析——对一个传统城市规划理念的实证检验. *城市规划学刊*, (6): 55-60.
- [43]柴彦威, 张艳, 刘志林. (2011). 职住分离的空间差异性及其影响因素研究. *地理学报*, 66(2): 157-166.
- [44]周江评, 陈晓键, 黄伟, 等. (2013). 中国中西部大城市的职住平衡与通勤效率——以西安为例. *地理学报*, 68(10): 1316-1330.
- [45] Wang D, Chai Y. (2009). The jobs-housing relationship and commuting in Beijing, China: the legacy of Danwei. *Journal of Transport Geography*, 17(1): 30-38.
- [46] Zhao P, Lu B, Roo G. (2011). Impact of the jobs-housing balance on urban commuting in Beijing in the transformation era. *Journal of Transport Geography*, 19(1): 59-69.
- [47] Acker V V, Witlox F. (2011). Commuting trips within tours: how is commuting related to land use? *Transportation*, 38(3): 465-486.
- [48] Simon N. (2006). *Generalized additive models : an introduction with R* [M]. Chapman & Hall/CRC.
- [49] Marra G, Radice R. (2013). Estimation of a regression spline sample selection model[J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 61(61): 158-173.