

中西方城市建成环境与出行行为研究比较

Comparative Research on the Built Environment and Travel Behavior of Chinese and Western Cities

鲁大铭 赵雅静 张文佳
Lu Daming, Zhao Yajing, Zhang Wenjia

摘要：探索建成环境与出行行为的关系能够为指导可持续的城市发展提供理论支持。本文在对比中西方城市建成环境发展历程，以及“建成环境—出行行为”关系讨论的基础上，分别批判了基于5D的建成环境评估框架和基于线性假设的“建成环境—出行行为”关系分析在中国城市的不兼容性；进而指出，基于可达性视角的3A建成环境评估以及基于非线性假设的“建成环境—出行行为”关系在中国城市的适用性，并基于已有的实证案例整理了可能存在的非线性关系类型。本研究旨在为重新理解中国城市背景下的“建成环境—出行行为”关系提供新的思路，尤其是在我国城市发展从增量走向存量的时期，探索更加人本化和精细化的关系已经成为重要的发展趋势。

Abstract: Exploring the relationship between the built environment and travel behavior provides theoretical support for sustainable urban development. We find that the 5D framework and the linear assumption of built environment-travel research are not suitable for China by comparing the development history of the built environment of Chinese and Western cities, as well as the built environment-travel behavior research. Furthermore, we find that the 3A framework, including regional accessibility, local accessibility, and transportation accessibility, and the nonlinear assumption of built environment-travel research is suitable for Chinese cities. Besides, we also divide the types of non-linear relationships in built environment-travel research based on existing empirical cases. This research provides a new idea for revisiting the built environment-travel relationship in the Chinese urban context, particularly when China's urban development changes from stock planning to incremental planning. Thus, exploring the humanistic and refined built environment-travel relationship has become an important trend.

关键词：建成环境；出行行为；可达性框架；非线性关系；研究综述

Keywords: Built Environment; Travel Behavior; Accessibility Framework; Non-linear Relationship; Literature Review

深圳市科技创新重点项目 (GXWD20201231165807007-20200810223326001)，国家自然科学基金 (42171201)，广东省应用基础研究基金面上项目 (2020A1515010847)，深圳市科技创新面上项目 (JCYJ20190808173611341)

作者：鲁大铭，北京大学城市规划与设计学院，博士研究生。ludm@pku.edu.cn
赵雅静，硕士，北京城建设计发展集团股份有限公司，助理规划师。
zhyjchya@hotmail.com
张文佳（通信作者），北京大学城市规划与设计学院，研究员，博士生导师。
wenjiashang@pku.edu.cn

引言：中西方城市建成环境与行为关系研究的背景差异

20世纪以来，欧美国家受城市蔓延的影响逐渐形成了小汽车依赖的出行方式，交通拥堵之下相伴而生了尾气排放、环境污染，并进一步危害居民的身体健康^[1-2]。如图1所示，随着这些城市病逐渐严峻，环境、社会和经济三方出现失衡，城市的良性发展受到了制约。为扼制负面效应的持续放大，规划学者、地理学者和政府管理者开始回归对城市建成环境的思考，探索通过空间优化来减少居民对于机动车的依赖^[3]。一方面，建筑设计师与规划学者发起新城市主义运动，分别在美国和欧洲国家应用精明增长和紧凑城市理念指导实践，控制城市蔓延，鼓励居民转向使用公共交通出行^[4-5]；另一方面，学者从空间分析入手，建立城市空间要素指标与出行行为指标的线性关联模型，识别出建成环境各类要素的作用效应，从而提出优化建议^[6-8]。整体而言，上述两种思路本质上都着眼于建成环境本身的要素配置，通过发展紧凑土地利用，减少远距离出行需求，从而缓解汽车依赖。

相较于西方城市，中国城市经历了从高度计划经济到土地开发市场化的发展历程（图1）。起初，在“单位制”的背景下，综合居住区的规划理念致力于构建单位大院内部的职住平衡，步行和自行车成为早期主要的出行工具^[9]。改革开放以后，“单位制”开始瓦解，人口不断涌入城市，刺激了对于城市空间的需求，在早期土地开发市场化的制度支持下，城市进入大规模扩张建设阶段。然而，早期城市扩张主要表现为郊区化的高密度蔓延、“摊大饼”

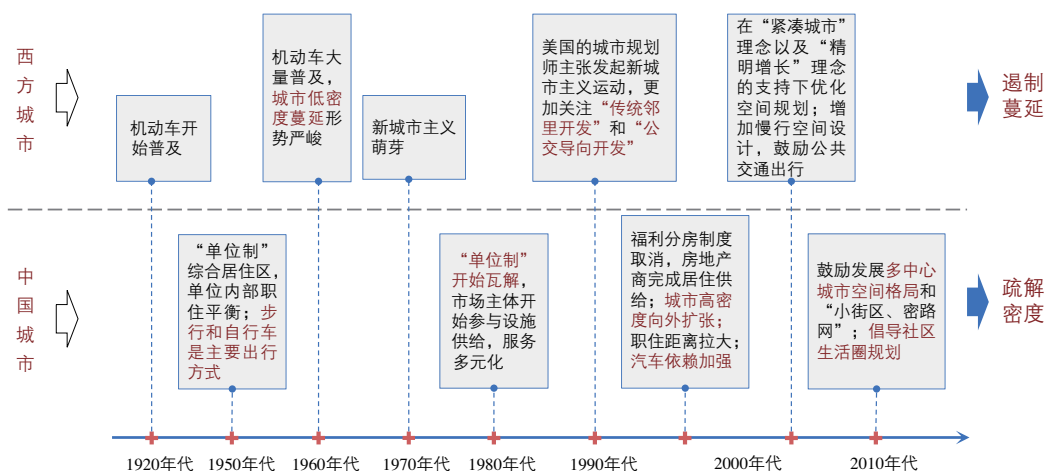


图1 中西方城市发展和空间结构变化的背景对比

扩张，间接导致了职住分离、基础设施供给不足、机动车保有量高速增长等一系列城市、环境和交通问题^[10-11]，进而组合多中心的总体规划和社区生活圈成为破解上述城市问题的重要手段。其中，在城市总体规划层面，鼓励发展多中心空间结构来分散居住和就业；在社区规划层面，推进社区生活圈建设以实现居民日常需求的就近供给。这些策略都凸显了中国城市空间规划的实践特点，同时也引发了思考——有必要根据中国的城市空间特征开展研究工作，从而获取能够有效指导规划实践的政策建议。

综上所述，中国的城市发展历程与西方发达国家城市有相似性，如都面临职住分离引发的对机动化出行的依赖，但也有显著不同的地方，如西方城市机动化的背后普遍是低密度城市蔓延，而中国在机动化之前就已经形成了高密度、高混合度的城市形态^[12]。一个重要的原因在于，中国城市的总体规划长期以来鼓励对土地功能的混合利用，并制定了严格的标准。由此，应对西方城市交通问题的土地致密化策略和混合土地利用等开发策略面对中国的交通问题能否发挥作用，尚待进一步探讨^[13-14]。

1 西方城市蔓延背景下建成环境和出行行为研究

西方城市的蔓延扩张及其所带来的交通、环境等问题经历了一个较为漫长的形成和发展过程^[15]。1920年代，西方发达国家进入汽车出行时代，小汽车出行的便捷激励大批中产阶级迁往郊区追求更适宜的生活环境。这一背景下，西方城市开始低密度向郊区扩张，汽车依赖的出行方式也渗透进居民的日常生活。1960年代，土地利用效率低下、交通拥堵、环境污染以及种族隔离等城市问题愈演愈烈，并逐渐扩大成为社会问题。“城市蔓延”作为对过去城市发展方式的反思引起热议，如何对城市开发实施有效的引导和管控，成为学

者和城市管理者关注的焦点^[16-17]。由此，城市规划学者和规划师开始从发展理念和实证研究两条路径开展探索，尝试通过建成环境优化，引导西方城市居民转向使用更加可持续的出行方式。

1.1 西方建成环境规划理念对比：新城市主义、精明增长和紧凑城市

1920年代以来，邻里单位的设计助推了西方城市构建迎合汽车使用的城市形态，而新城市主义运动、精明增长和紧凑城市所倡导的城市发展理念是对过去城市功能空间的重新组织^[3,18]。

新城市主义运动萌芽于1970年代，是当时规划师为缓解战后美国城市低密度扩张蔓延带来的汽车长距离通勤、交通拥堵、环境污染、社会资源分配不公等问题所掀起的一场有关城市规划设计的变革^[19]。借鉴传统“邻里单元”的社区规划模式，建筑师和规划师基于对公共设施和社会多元融合理念的关心，重组整合提出了更加关注人本的“传统邻里开发”（TND: Traditional Neighborhood Development）和“公交导向开发”（TOD: Transit-Oriented Development）两种模式。其中，TND关注多元公共服务设施的混合布局并服务于居民，以实现就近步行可达，通过在紧凑集约的邻里空间内满足居民日常的活动需求来减少对汽车出行的依赖^[20]。TOD则更关注围绕公共交通枢纽发展多功能服务社区，强调以公共交通站点为中心，集聚商业、办公、居住、休闲等多元服务设施，发展高密度、高混合利用的车站空间，同时方便不同交通工具的便捷转换，构建公共交通友好型的社区环境^[21]。

另外，部分美国规划学者提出精明增长理念，旨在根据城市蔓延的特征进行反向管控^[22]。区别于新城市主义从设计层面和街区尺度关注功能空间的组织优化，精明增长更加侧

重宏观的管控——尝试从城市尺度提出一系列遏制城市蔓延增长的规则来限制城市侵占郊区生态空间、农业空间，实施无序、低密度的城市扩张建设^[23]。事实上，就内涵来说，精明增长与新城市主义大同小异，皆聚焦于发展紧凑的空间组织方式，关注多种交通出行方式的公平性。

紧凑城市理念可以追溯到1990年代欧洲社区委员会在环境绿皮书中所倡导的“边界内开发、高密度、混合功能、公交导向”。紧凑城市理念以延续欧洲历史上高密度城镇发展方式应对战后欧洲城市蔓延，指出要限制郊区的发展，必须通过改善城市的空间环境、鼓励恢复城市的活力来吸引居民重新回归市中心^[24]。具体的空间发展策略包括：关注公共空间以及生态绿地的保护；发展混合土地利用，实现居民日常服务设施供给的公平性与可达性；划定城市增长边界，鼓励高容积率发展；促进公共交通的发展规划，改善小汽车依赖出行的同时提高居民前往各类设施的可达性；等等^[25]。

除规划理念的发展之外，西方城市的理论研究也受到当时当地城市基本特征的影响。首先，西方低密度、单一土地利用的蔓延式城市发展模式导致密度和多样性等建成环境要素的变化成为研究的关注点，其研究往往假设只要对建成环境的各个指标进行适度增加便可以优化出行行为（即增量优化），如通过致密化的发展策略减少机动车的购买率和使用率等^[22,23]。其次，上述理念与应用假设引导实证分析更多关注特定建成环境的改变是否能够显著影响出行行为，即显著性，以及每增加一定比例的建成环境指标能够带来多大比例的行为结果优化，即弹性^[6,8]。由此，这两个关键研究问题使得西方多数的“建成环境—出行行为”关系的实证研究立足于线性假设的相关分析上，旨在回答：每增加（或减少）1%的建成环境要素，可以何种程度降低（或增加）特性出行行为的百分比。

1.2 强调增量优化的“建成环境—出行行为”实证研究依赖于线性分析

在西方城市语境下，强调增量优化使得建成环境与出行行为之间的显著性和弹性分析成为焦点，而显著性与弹性均可通过建成环境与出行行为之间的线性回归建模估算得到。在建成环境端，相关实证研究普遍采用尤因和塞韦罗（Ewing & Cervero）在2010年归纳的5D框架，包括密度（density）、土地利用多样性（diversity）、城市设计（design）、到目的地的距离（distance to destination），以及到公共交通站点的距离（distance to transit）五个方面^[7]。在出行行为端，多数研究关注与出行模式有关的变量，包括机动车出行距离（VMT: vehicle miles traveled）、步行距离（walking distance），以及地

铁乘坐人数（metro ridership）等；也有部分研究关注可能影响出行行为的变量，包括汽车拥有量（car ownership）、职住平衡（jobs-housing balance）等。由此，学者开展了大量针对西方城市的线性模型实证研究，为理解城市建成环境与居民出行行为的显著性和弹性关系提供了丰富的证据。

以小汽车出行为例，已有研究表明建成环境变量对VMT的影响具有不同的显著性程度（表1）^[7,8]。首先，到达城市中心距离（distance to downtown）、人口密度（population density）、基于汽车的就业可达性（job accessibility by auto）和交叉路口密度（intersection density）等指标通常与VMT表现出较高的显著性水平，即在1%或5%水平上显著，说明改变上述指标具有较大可能性影响VMT。其次，土地利用混合度（land use mix）、就业密度（job density）、四岔路口的比例（% four-way intersections）和到达最近公共交通汽车站点的距离（distance to nearest transit stop）等与VMT通常表现出较低的显著性水平，即在10%的水平上显著，说明这些变量具有一定可能性影响VMT。最后，基于公共交通的就业可达性（job accessibility by transit）和职住平衡通常与VMT呈现出不显著关系，说明改变这些变量很大程度上无法有效影响VMT。总体而言，显著性检验为理解“建成环境—出行行为”关系的稳定性提供了定量化的测度，也为不同规划手段的可靠性提供了科学的依据。

在影响程度方面，已有研究证明建成环境变量对VMT具有不同弹性的作用^[7,8]。根据尤因和塞韦罗^[7]以及史蒂文斯（Stevens）^[8]两篇元分析综述文献，已有的实证研究表明，到达城市中心距离（取倒数）对VMT的平均弹性系数位列所有建成环境中的首位，约为-0.22或-0.34（表1）。这说明居住地到城市中心的距离减少1%，居民家庭的VMT减少0.22%或0.34%。类似地，其他弹性较高的变量还包括：

表1 基于元分析文献综述的建成环境与VMT的关系估算

变量	尤因和塞韦罗 ^[7]	史蒂文斯 ^[8]
到达城市中心距离	-0.22a	-0.34a
人口密度	-0.04a	-0.10a
基于汽车的就业可达性	-0.20a	-0.20a
交叉路口密度	-0.12a	-0.14a
四岔路口的比例	-0.12b	-0.06b
土地利用混合度	-0.09b	-0.03b
到达最近公共交通汽车站点的距离	-0.05b	-0.05b
就业密度	0.00b	-0.01b
基于公共交通的就业可达性	-0.05c	0.00c
职住平衡	-0.02c	0.00c

注：a为较高的显著性水平（1%或5%）；b为中等的显著性水平（5%或10%）；c为不显著。

人口密度（-0.04/-0.10）、基于汽车的就业可达性（-0.20/-0.20）和交叉路口密度（-0.12/-0.14）。由此，相较于其他建成环境要素，增加人口密度、基于汽车的就业可达性和交叉路口密度可以在较大程度上降低 VMT。此外，对 VMT 影响弹性较小的变量包括：四岔路口的比例（-0.12/-0.06）、土地利用混合度（-0.09/-0.03）、到达最近公共交通汽车站点距离（取倒数；-0.05/-0.05）和就业密度（0.00/-0.01）等。这一结果说明降低上述建成环境因素，通常只能在较小的程度上降低 VMT。同时，也有部分指标（如基于公共交通的就业可达性和职住平衡等）被证明在多数情况下，对 VMT 影响的弹性系数非常有限，甚至趋近于 0。

综上所述，基于线性关系假设的实证分析体现了西方城市背景下建成环境对出行行为影响的作用机理，也回应了城市发展的实践需求，为指导空间规划和降低汽车依赖提供了有力的支持。显著性和弹性的测度结果回应了新城市主义运动、精明增长和紧凑城市等理念提出的发展策略，并且基于实证分析获得了普遍结论——鼓励发展紧凑的城市空间，提升密度，发展多功能混合集聚，加大公共交通设施供给，增加设施的就近配置实现步行出行，能够对于缓解机动车依赖提供支持，并有效引导城市以及社区环境向着更为人本化的方向发展。

2 中国高密度城市背景下建成环境和出行行为研究

中国的城市在 1970 年代改革开放以后步入了快速发展阶段，交通拥堵、环境污染等城市问题也逐渐暴露在大众的眼前。中国的城市管理者 and 学者广泛借鉴了西方城市的发展策略。在政策方面，鼓励职住平衡的土地利用政策，发展公共交通系统建设，营造步行 / 自行车友好型的城市环境以鼓励居民绿色出行。同时，学界开始在西方研究的基础上开展有关建成环境和出行行为互动关系的探讨，经过近十多年的发展，已形成了一定的积累^[26-28]。然而，不同于西方市场导向的城市蔓延，中国的城市蔓延是在高密度中心城区持续发

展的基础上，为满足持续扩张的人口承载需求所进行的郊区用地低效、分散开发^[29]。

2.1 中国城市空间布局规划演进：城市空间结构与居住区单元规划

中国的城市空间发展策略包括宏观的城市空间结构调整和微观的居住单元调整两个方面^[28,30]。通过回顾空间规划政策背后所体现的社会生活理念，笔者尝试从制度理论层面理解城市空间对居民出行行为的影响过程。

在宏观的城市空间结构调整方面，中国城市经历了从高度计划经济下的严格的功能分区到市场化下的城市蔓延发展，再到有计划的多中心发展的过程。如表 2 所示，1970 年代以前，计划经济时代下中国通过建立城市功能分区和“单位制”直接组织和管理城市生产生活^[9]。不同功能分区内的各个单位形成的封闭围合的空间参与城市发展运作，也相应塑造了城市整体空间格局，同时庞大的公共交通体系支撑了城市内部的居民日常出行需求^[31]。随着 1970 年代后期市场经济体制改革，市场力量突破了计划时代下形成的单位格局，到 1990 年代末期，快速城镇化带动了城市建成区空间的扩张，土地有偿使用制度的推行使不同要素对于城市区位的选择更加自主。此外，城市蔓延和城市综合交通设施体系的构建不可避免地相互促进，中国的大城市逐渐不同程度地陷入了“摊大饼”的发展状态^[32]。进入 21 世纪以来，中国特大城市以构建“舒展的紧凑城市系统”为目标，在发展战略中都明确提出多中心的发展模式^[30,33]。然而，市场进行资源配置在打破原有单位格局的同时加大了职住空间的“撕裂”，城市就业的集中分散能否达到规划预期的目标仍有待进一步检验。

在微观的居住区单元规划调整方面，中国城市经历了从统一计划供给到“以人为本”的个性化供给，逐步寻求公共服务均等化配置的过程^[34-35]。1970 年代之前，中国的居住区规划严格构建了服务计划经济体制的单位大院，构建了城市

表 2 中国城市居住区规划发展历程

时期	1949 年—1950 年代初	1950 年末—1970 年代末	1970 年代末—1990 年代中后期	1990 年代中后期—2012 年	2012 年至今
空间范围	邻里单元	居住小区和居住组团两级	居住区、居住小区以及居住组团三级		15、10、5 分钟社区生活圈三级
发展理念	基于邻里单位的住宅布局与服务设施	先生产再生活；批量模式化建设；按计划指标统一配套公建		住房市场化；设施多元化；居住环境提升	以人为本；公共服务设施均等化；小街区密路网
空间策略	以小学为中心的单元	根据居住区人口定额配套		基于千人指标的规划配置	在不同层级空间范围的差异化供给
管理体制	街道制为主体	单位制为主体；街道管理制为辅助	街道管理制占主体	社区制与街道管理制并行	
行为主体	政府主体	政府主体与单位制并行		市场主体与政府主体并行	
政策文件	—	原国家经委颁布的定额指标文件（1964 年）	原国家建委《城市规划定额指标》（1980 版）	《城市居住区规划设计规范》（2002 版，2016 版）	《城市居住区规划设计标准》（2018 版，2020 版）

内部具有“小福利国家”性质的组成单元,使城市居民可以在单位内满足日常生活的需求,步行和自行车可以支撑单位大院内大多数的日常出行。随着1970年代末期改革开放潮流的渗透,市场制度萌芽、兴起,单位制逐渐瓦解,市场主体参与到居住区配套建设中,“全国住宅建设试点小区工程”和土地有偿使用制度等一系列政策出台,加速了服务设施多样化的供给。1990年代末期,房地产的市场化进一步强化了市场实施配套建设的主体地位。然而,由于早期的商品房建设对于配套设施的供给远远不足,同时大量地处郊区的居住区功能单一,生活其中的居民只能通过前往中心城区满足必要的休闲娱乐活动,长距离的交通需求又间接促进了机动化快速发展。进入21世纪以来,国家的城镇化速度开始放缓,土地资源的稀缺性暴露出来,老龄化进程加快,城市的发展从重视空间数量转向关注空间品质升级,“人”的需求逐渐被视为规划的重点。由此,“小街区、密路网”的街区设计、15分钟社区生活圈等一系列措施致力于完善社区功能,营造满足多元服务需求的城市街区,同时引导居民个体回归绿色低碳出行。

2.2 模仿西方增量优化线性逻辑的中国城市建成环境与出行行为实证研究

在过去十多年,中国学者在西方研究的基础上开展了一系列有关中国建成环境和出行行为关系的实证研究。根据王冬根和周萌(Wang & Zhou)的综述性文献,在建成环境端,关注最多的变量包括:职住平衡、公共交通可达性(transit accessibility)、社区类型(neighborhood type)、人口密度和居住区位(residential location)等;主要关注的城市涵盖北京、上海、南京、广州和杭州等^[37]。在出行行为端,出行时间/距离/频率(travel time, travel distance, trip frequency)、通勤时间/距离(daily commuting time and distance)、出行模式选择(transport mode choice)等变量成为主要的研究对象^[37]。可见,学者开展了对中国城市“建成环境—出行行为”关系的探索。

同样以小汽车出行距离为例,在建成环境与VMT关系的显著性程度方面,虽然一部分中国研究验证了西方研究的理论假设,但是也有部分研究提出了差异化的结论。例如:部分研究发现,较高的人口密度和较高的土地利用混合度与VMT呈现显著的负相关关系^[38];也有部分研究发现人口密度或土地利用混合度与VMT的关系可能并不显著^[14,39]。一个可能的解释在于,中国大城市的密度和混合度水平普遍远远高于西方城市,因此进一步提高密度和混合度能够带来的降低VMT的边际效益不断降低,这一发现也暗示了在中国城市推进致密化发展可能会收效甚微^[14]。此外,职住平衡、

公共交通可达性等西方城市与VMT的关系并不显著或显著性较低的建成环境要素,却在中国城市呈现了与VMT较高的显著性关系^[14,30,40,41]。有限的实证研究均表明,直接使用起源于西方城市研究的5D框架解释中国城市的“建成环境—出行行为”的关系可能并非最优方案。由此,立足中国城市的发展历史和规划哲学,结合西方研究经验,提出适用于中国城市的建成环境评估框架已经成为迫切需要面对的重点问题。

在弹性的测度方面,基于中国城市的研究同样提出了与西方城市不同的研究结论^[37,42]。例如张文佳等(Zhang et al.)在北京的一项研究发现,人口密度对VMT影响直接效应的平均弹性约为0.45——这一发现不但大于西方城市普遍的弹性系数,而且人口密度对VMT产生了相反的作用^[14];此外,虽然多数中国城市的研究没有计算相应的弹性系数,但是部分研究也发现人口密度与机动车使用之间呈现出正向或不显著的关系,从而也间接说明了5D框架并非解释中国城市的最佳方案^[39,41]。上述发现同时呼应了国际上关于紧凑城市谬论(the compact city fallacy)和强化悖论(the paradox of intensification)的讨论,即超高密度的增长可能会导致VMT的增加^[43,44]。一个最为主要的解释在于,密度乃至所有建成环境要素对出行行为的影响都并非线性,尤其是在中国高密度、高混合度的城市背景下,当密度增长超越阈值,其对VMT的影响可能失效甚至会发生反转^[14]。此外,除密度外,在土地利用混合度和公共交通可达性等方面,也有研究提出了与西方研究相左的结论^[40]。上述研究发现直接表明,西方城市研究长期沿用的线性关系假设在中国并不适用,尤其是面对不同规模和发展阶段的城市时,更需要非线性的关系探讨,才能更准确地探索中国城市语境下的“建成环境—出行行为”关系研究^[42]。

综上所述,值得肯定的是,早期直接模仿西方的实证思路为理解中国城市“建成环境—出行行为”的关系提供了基础,然而随着研究的深入,构建立足中国城市特征的研究范式已经成为最为紧迫的学科问题。一方面,我们亟须构建适用于中国城市背景的建成环境评估框架。5D的建成环境评估框架起源于西方学者对西方城市长期的思考和探索,与西方城市低密度、低混合度和汽车依赖,增量优化与线性发展的规划思维,以及高度市场化、资本化的制度息息相关。然而,回顾中国城市规划长期以来在区域结构、社区规划和公共交通设施等方面的探索,一个基于可达性视角的3A框架(区域可达性、社区可达性与公共交通可达性)也许能够提供更加优化的评估方案^[14]。另一方面,我们亟须形成基于非线性假设的“建成环境—出行行为”研究范式。线性假设源于西方城市建成环境要素的分布范围,考虑到中国城市高密

度、高混合度和丰富的公共交通体系，非线性假设表现出了对中国城市研究更好的匹配性^[30]。

3 中国高密度城市“建成环境—出行行为”关系研究需要强调非线性优化

通过对中西方城市“建成环境—出行行为”相关文献的分析，不难发现将线性关系假设直接应用于中国城市研究，难以指导高密度背景下的建成环境优化。因此，本论文尝试提出“建成环境—出行行为”的非线性关系的假设，即随着建成环境变量的均匀变化，出行行为变量不一定始终作出同等程度的响应。基于非线性关系的假设以及相应的阈值效应，有助于实现对不同建成环境有效作用范围的测度^[45,47]。

关于探索非线性关系，一项难点在于分析技术的限制——早期的探索研究主要通过统计描述的方法或非线性变化的方法检验非线性。弗兰克和皮沃（Frank & Pivo）通过描述性分析识别出就业密度在 25~75 人/英亩时，居民使用小汽车通勤出行的比例会随着密度的增大出现下降；就业密度到达 75~125 人/英亩时，变化则不再显著^[48]。科和曹新宇（Ko & Cao）通过引入自变量平方项，探讨了到轻轨的临近性与周边工商业价值之间的非线性关系，并发现随着到轻轨距离的增加，工商业价值变化的速率变缓^[49]。张文佳和张明（Zhang & Zhang）运用了多层多项 Logit 回归，提供了将变量进行取对数转换回归线性假设来探讨非线性关系的思路^[50]。

上述方法虽然在数据关系的形态上脱离了线性的束缚，但是仍然没有摆脱线性假设的本质，近期有学者尝试通过引入机器学习模型或高级计量经济模型，以实现非线性关系的直接测度。例如：丁川等（Ding et al.）首次将梯度增强决策树（GBDT: Gradient Boosting Decision Tree）模型应用于建成环境领域的研究，发现当人口密度从 10 人/英亩增加到 25 人/英亩，选择汽车出行的概率下降约 1%；当人口密度继续增加到 35 人/英亩，这一概率降低了约 5%；而当人口密度超过 35 人/英亩，二者的关系则趋于稳定，形成明显的阈值效应^[45]。随后，我国学者基于 GBDT 等机器学习模型又开展了大量的实证工作，证明了非线性关系存在的广泛性^[28,47,51]。此外，也有部分学者基于分段函数的思路，尝试借鉴广义加性模型（GAM: Generalized Additive Model）测度建成环境在不同范围对出行行为作用强度的差异性。例如：帕克等（Park et al.）基于 GAM 模型研究发现，将城市中心的活动密度维持在 10 000~25 000 人/km²，道路交叉口密度保持在 150~300 个/km²，十字路口的占比在 60% 以上，公共交通站点 25~150 个/km² 且能够覆盖 5%~35% 的就业机会，将最大程度促进步行和公共交通使用，以及减少 VMT^[52]。对于上述研究结果，一个可能的解释在于规模效应

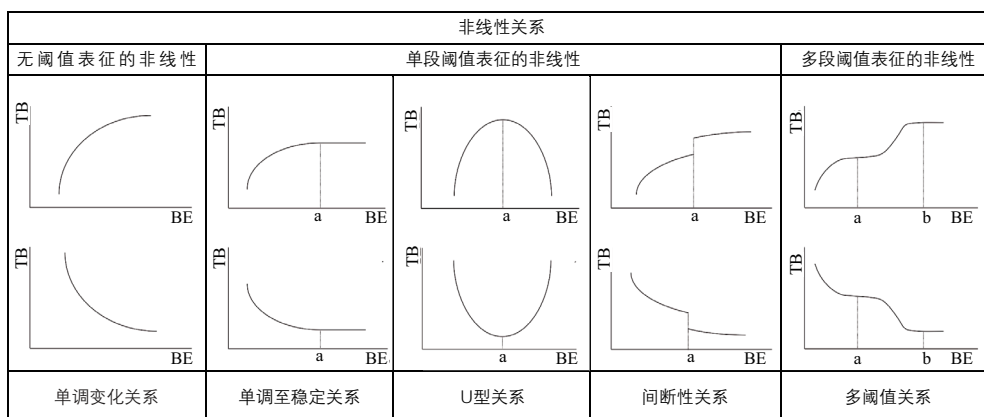
所带来的边际效益逐渐降低，直至转变为规模不经济的现象，即经济学所强调的边际收益递减律（diminishing marginal returns）。例如：在人口密度从较低水平增加至中等水平的过程中，人口集聚形成规模效应，人均 VMT 便随之减少；当其边际收益逐渐减弱直至趋于“0”值，人均 VMT 便不再随着人口密度增加而变化，从而形成阈值效应；或当其边际效应出现反转时，人均 VMT 逐渐增加，便可能出现“U”形关系^[14]。

上述研究结果揭示了“建成环境—出行行为”之间复杂的非线性关系，重新审视了传统线性关系假设下可能造成的研究偏差。尤其是当前中国城市高密度、高混合度，公共交通系统发达便利，传统致密化的策略面临规划失灵等一系列理论和实践问题，开展精细化的非线性研究的重要性不言而喻。由此，参照有限的基于非线性假设的“建成环境—出行行为”实证研究，结合测度建成环境变量有效作用范围的规划目标，本研究从阈值表征的角度尝试对非线性关系的类型进行划分。

如图 2 所示，基于阈值出现的次数，非线性关系可分为无阈值表征的非线性、单段阈值表征的非线性和多段阈值表征的非线性三种类型。首先，无阈值表征的非线性是一种单调变化关系，即建成环境要素持续变化会导致出行行为持续变化，但是出行行为变量的变化速率并不均匀，并且在全部范围内并未出现阈值。已经发现的无阈值表征的非线性关系可能存在于城市中心可达性与汽车拥有量之间，以及地铁站点中介中心性与地铁使用量之间等^[28,47]。

其次，单段阈值表征的非线性包含三种子类型。第一种是单调至稳定关系，即建成环境要素变化会导致出行行为随之持续变化，但当超出特定范围时，出行行为不再随着建成环境要素的增加（或减少）继续变化。已经发现的单调增（减）至稳定的非线性关系广泛存在，如各类土地利用设施与 VMT 之间的关系，以及就业密度与汽车拥有量之间的关系^[28,30]。第二种是 U 型关系，即建成环境要素变化会持续改变出行行为，但是在特定阈值前后的影响作用相反。已发现的 U 型关系可能存在于人口密度与职住距离之间、汽车拥有量与 VMT 之间^[14]。第三类是间断性关系，即建成环境要素变化导致的出行行为变化在某一临界点会发生跳跃。已发现的间断性关系可能存在于社区可达性与汽车拥有量之间，以及不同土地利用占比与地铁使用量之间^[28,47]。

最后，仍然存在多段阈值表征的非线性这种更为复杂的关系，可称为多阈值关系，即建成环境要素变化导致出行行为持续变化，但是出行行为在变化过程中交替出现增减或稳定状态。已发现的多阈值关系可能存在于公共交通可达性与汽车拥有量之间^[28]。



注：BE—建成环境，TB—出行行为。

图2 按照阈值划分的非线性特征类型

4 总结与展望

本文通过回顾中西方建成环境规划理念的转变，以及“建成环境—出行行为”关系研究的特征，尝试甄别符合中国城市发展的面向可持续出行行为的建成环境优化方向与实证分析策略。通过对比分析，本研究发现中西方城市至少存在三点差异（表3）。第一，不同于西方城市低密度蔓延的发展模式，中国城市具有高密度、高混合度的城市特征，为实证研究提供了迥异的场景。第二，不同于西方城市长期以来遵循高度市场化的发展导向，中国城市普遍经历了从高度计划经济到逐渐市场化开放的发展历程，历史规划产物的痕迹（如单位大院）仍然深刻影响着当今的城市发展。第三，不同于西方城市高度的汽车依赖，中国城市普遍具有庞大且丰富的公共交通网络，长期以来支撑了城市内部的出行活动。理解上述差异对于探索中国城市“建成环境—出行行为”的复杂关系，进而指导中国城市的规划实践具有重大意义。

在理论研究方面，未来的工作应当立足中国城市的独特性，因地制宜地提出符合中国城市特征的研究范式，至少应包含两个方面（表3）。第一，在建成环境的评估方面，已有的研究广泛证明了源于西方城市的5D框架在中国城市的不兼容，而基于区域可达性、社区可达性和公共交通可达性的3A框架可能为破解这一难题提供可能。第二，在“建成环境—出行行为”关系的假设方面，同样源于西方城市的线性假设主要关注环境对行为的影响是否存在，在诸多方面难以应用于中国城市研究；而非线性假设可用于评估环境对行为的影响程度，相关分析技术的发展为解决这一问题提供了新的思路。

此外，本研究仍然存在一些不足。一方面，起源于新城市主义、精明增长与紧凑城市的“建成环境—出行行为”研究关注多种交通行为要素，包括VMT、非机动车出行距离

表3 中西方城市建成环境的主要特征和研究范式对比

对比要素	中国城市	西方城市
发展模式	高密度、高混合度扩张	低密度蔓延
发展历程	由高度计划的单位大院逐渐向市场化过渡	长期高度市场化发展
交通基础	丰富的公共交通基础	高度的汽车依赖
分析框架	可达性3A框架	5D框架
研究假设	非线性假设	线性假设

和地铁乘坐人数等，但由于文章篇幅限制，本研究仅聚焦于VMT这一项变量，未能全面反映出西方该领域研究的全貌。另一方面，不同于西方城市（尤其是美国城市）对私家汽车的高度依赖，中国城市通常具有较好的公共交通设施基础，这一差异也呼吁着更加中国化的交通行为变量选取，尤其是以VMT为代表的侧重小汽车使用的指标，是否可以直接作为反映中国城市“建成环境—出行行为”关系的最为准确的分析视角，仍然有待进一步的讨论和探索。UPI

注：文中图表均为作者绘制。

参考文献

- [1] HANDY S, CAO X, MOKHTARIAN P. Correlation or causality between the built environment and travel behavior? evidence from Northern California[J]. Transportation research part d: transport and environment, 2005, 10: 427-444.
- [2] NÆSS P. Urban structure matters: residential location, car dependence and travel behaviour[M]. New York, London: Routledge, 2006.
- [3] KATZ P. The New Urbanism. toward an architecture of community[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [4] CALTHORPE P. The next American metropolis: ecology, community, and the American dream[M]. New York: Princeton Architectural Press, 1993.
- [5] ANDRES D, ELIZABETH P Z. The second coming of the American small town[J]. Wilson quarterly, 1992, 16(1): 3-51.
- [6] EWING R, CERVERO R. Travel and the built environment: a synthesis[J].

- Transportation research record, 2001, 1780(1): 87-114.
- [7] EWING R, CERVERO R. Travel and the built environment: a meta-analysis[J]. Journal of the American Planning Association, 2010, 76(3): 265-294.
- [8] STEVENS M R. Does compact development make people drive less?[J]. Journal of the American Planning Association, 2017, 83(1): 7-18.
- [9] 柴彦威, 陈零极, 张纯. 单位制度变迁: 透视中国城市转型的重要视角[J]. 世界地理研究, 2007, 16(4): 60-69.
- [10] HU L, YANG J, YANG T, et al. Urban spatial structure and travel in China[J]. Journal of planning literature, 2020, 35(1): 6-24.
- [11] 刘志林, 张艳, 柴彦威. 中国大城市职住分离现象及其特征——以北京市为例[J]. 城市发展研究, 2009(9): 110-117.
- [12] 魏后凯. 中国大城市交通问题及其发展政策[J]. 经济工作者学习资料, 2001(5): 2-11.
- [13] 曹新宇. 社区建成环境和交通行为研究回顾与展望: 以美国为鉴[J]. 国际城市规划, 2015, 30(4): 46-52.
- [14] ZHANG W, LU D, CHEN Y, et al. Land use densification revisited: nonlinear mediation relationships with car ownership and use[J]. Transportation research part d: transport and environment, 2021, 98: 102985.
- [15] BRUECKNER J K. Urban sprawl: diagnosis and remedies[J]. International regional science review, 2000, 23(2): 160-171.
- [16] CERVERO R, GUERRA E, AL S. Beyond mobility: planning cities for people and places[M]. Washington DC: Island Press, 2017.
- [17] NECHYBA T J, WALSH R P. Urban sprawl[J]. Journal of economic perspectives, 2004, 18(4): 177-200.
- [18] TURNER M A. A simple theory of smart growth and sprawl[J]. Journal of urban economics, 2007, 61(1): 21-44.
- [19] ELLIS C. The new urbanism: critiques and rebuttals[J]. Journal of urban design, 2002, 7(3): 261-291.
- [20] KHATTAK A J, RODRIGUEZ D. Travel behavior in neo-traditional neighborhood developments: a case study in USA[J]. Transportation research part a: policy and practice, 2005, 39(6): 481-500.
- [21] CERVERO R. Transit-oriented development in the United States: experiences, challenges, and prospects[M]. Washington DC: Transportation Research Board, 2004.
- [22] HANDY S. Smart growth and the transportation-land use connection: what does the research tell us?[J]. International regional science review, 2005, 28(2): 146-167.
- [23] GRANT J L. Theory and practice in planning the suburbs: challenges to implementing new urbanism, smart growth, and sustainability principles[J]. Planning theory & practice, 2009, 10(1): 11-33.
- [24] BURTON E, JENKS M, WILLIAMS K. The compact city: a sustainable urban form?[M]. London: Routledge, 2003.
- [25] JENKS M J, BURGESS M J R, ACIOLY C, et al. Compact cities: sustainable urban forms for developing countries[M]. London: Taylor & Francis, 2000.
- [26] SUN B, 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(B): 441-453.
- [27] CHENG L, CHEN X, YANG S, et al. Active travel for active ageing in China: the role of built environment[J]. Journal of transport geography, 2019, 76: 142-152.
- [28] ZHANG W, ZHAO Y, CAO X J, et al. Nonlinear effect of accessibility on car ownership in Beijing: pedestrian-scale neighborhood planning[J]. Transportation research part d: transport and environment, 2020, 86: 102445.
- [29] 饶传坤, 韩卫敏. 我国城市蔓延研究进展与思考[J]. 城市规划学刊, 2011(5): 55-62.
- [30] ZHANG W, LU D, ZHAO Y, et al. Incorporating polycentric development and neighborhood life-circle planning for reducing driving in Beijing: nonlinear and threshold analysis[J]. Cities, 2021: 103488.
- [31] 张京祥, 罗震东, 何建颐. 体制转型与中国城市空间重构[M]. 南京: 东南大学出版社, 2007.
- [32] 陈秉钊. 北京城市建设的战略抉择——抓住机遇摆脱“摊大饼”[J]. 城市规划, 1999, 23(12): 27-29.
- [33] YANG J, SHEN Q, SHEN J, et al. Transport impacts of clustered development in Beijing: compact development versus overconcentration[J]. Urban studies, 2012, 49(6): 1315-1331.
- [34] 张文佳, 柴彦威. 时空行为研究前沿专栏序言[J]. 人文地理, 2021, 36(2): 1-2.
- [35] 柴彦威, 李春江. 城市生活圈规划: 从研究到实践[J]. 城市规划, 2019, 43(5): 9-16.
- [36] 张文佳, 鲁大铭. 影响时空行为的建成环境测度与实证研究综述[J]. 城市发展研究, 2019, 26(12): 9-16.
- [37] WANG D, ZHOU M. The built environment and travel behavior in urban China: a literature review[J]. Transportation research part d: transport and environment, 2017, 52: 574-585.
- [38] FENG J, DIJST M, WISSINK B, et al. Changing travel behaviour in urban China: evidence from Nanjing 2008-2011[J]. Transport policy, 2017, 53: 1-10.
- [39] LI S, ZHAO P. Exploring car ownership and car use in neighborhoods near metro stations in Beijing: does the neighborhood built environment matter?[J]. Transportation research part d: transport and environment, 2017, 56: 1-17.
- [40] YIN C, SHAO C, WANG X. Exploring the impact of built environment on car use: does living near urban rail transit matter?[J]. Transportation letters, 2020, 12(6): 391-398.
- [41] XIAO Z, LIU Q, WANG J. How do the effects of local built environment on household vehicle kilometers traveled vary across urban structural zones?[J]. International journal of sustainable transportation, 2018, 12(9): 637-647.
- [42] HU L, YANG J, YANG T, et al. Urban spatial structure and travel in China[J]. Journal of planning literature, 2020, 35(1): 6-24.
- [43] NEUMAN M. The compact city fallacy[J]. Journal of planning education and research, 2005, 25(1): 11-26.
- [44] MELIA S, PARKHURST G, BARTON H. The paradox of intensification[J]. Transport policy, 2011, 18(1): 46-52.
- [45] DING C, CAO X, NÆSS 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, 2018a, 110: 107-117.
- [46] TAO T, WANG J, CAO X. Exploring the non-linear associations between spatial attributes and walking distance to transit[J]. Journal of transport geography, 2020, 82: 102560.
- [47] ShAO Q, ZHANG W, CAO X, 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.
- [48] FRANK L D, PIVO G. Impacts of mixed use and density on utilization of three modes of travel: single-occupant vehicle, transit, and walking[J]. Transportation research record: journal of the transportation research board, 1994, 1466: 44-52.
- [49] KO K, CAO X. The impact of Hiawatha Light Rail on commercial and industrial property values in Minneapolis[J]. Journal of public transportation, 2013, 16: 47-66.
- [50] ZHANG W, ZHANG M. Incorporating land use and pricing policies for reducing car dependence: analytical framework and empirical evidence[J]. Urban studies, 2018, 55(13): 3012-3033.
- [51] YANG J, CAO J, ZHOU Y. Elaborating non-linear associations and synergies of subway access and land uses with urban vitality in Shenzhen[J]. Transportation research part a: policy and practice, 2021, 144: 74-88.
- [52] PARK K, EWING R, SABOURI S, et al. Guidelines for a polycentric region to reduce vehicle use and increase walking and transit use[J]. Journal of the American Planning Association, 2020, 86(2): 236-249.

(本文编辑: 王枫)