

文章编号:1671-1637(2022)03-0041-14

自动驾驶影响下的出行行为研究综述

李瑞敏,戴晶辰

(清华大学 土木工程系,北京 100084)

摘要:从小汽车出行总需求、出行方式选择、在途时间利用三方面梳理了自动驾驶影响下的出行行为研究现状,分析了用于研究自动驾驶对出行行为影响的数据基础与研究方法,总结了影响自动驾驶环境下出行方式选择的关键因素,指出了出行行为研究存在的问题和未来发展方向。研究结果表明:出行总需求的相关研究主要关注当前服务不足人口的潜在出行,大多通过需求假设分析潜在的变化,在假设的可靠性和结果的准确度方面还存在不足;出行方式选择的相关研究显示车辆服务和出行属性、社会人口和家庭属性、出行习惯属性、居住地和环境属性、个人心理和偏好属性等是影响出行方式选择的关键因素,考虑到不同的研究对象、场景设计与分析方法,性别、年龄、持有驾照、家庭结构等因素对出行行为的具体影响还有待进一步检验;人们对自动驾驶时代在途时间利用的方式和受益程度的认知存在较大的不确定性与异质性,亟需理论模型来进一步讨论潜在的时间利用变化;基于自动驾驶对出行行为影响相关研究的局限性,提出了建立自动驾驶汽车的规范化描述和丰富数据采集方式,开展横向与纵向对比研究,加强各影响因素异质性的考量,辨析自动驾驶时代各类出行行为间的相互影响机制的改进方向。

关键词:智能交通;自动驾驶;出行行为;方式选择;在途时间利用;需求估计;综述

中图分类号:U491.2 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2022.03.003

Review on impact of autonomous driving on travel behaviors

LI Rui-min, DAI Jing-chen

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The research status of travel behaviors under the influence of autonomous driving was analyzed from three aspects: vehicle travel demand, travel mode choice, and travel time utilization. The data foundations and methodologies of existing studies on the impact of autonomous driving on travel behaviors were analyzed. The key factors affecting the choice of travel mode in the autonomous driving environment, existing challenges, and future development directions were discussed. Research results indicate that the studies on vehicle travel demand estimation primarily focus on the potential travel of underserved population and usually analyze the potential demand changes through assumptions, which have some deficiencies in terms of the reliability of the assumptions and the accuracy of the results. The studies on travel mode choice show that vehicle service and travel attributes, social demographic and family attributes, travel habits attributes, residential and environmental attributes, personal psychology and preference

收稿日期:2022-02-13

基金项目:国家重点研发计划(2019YFB1600100)

作者简介:李瑞敏(1979-),男,山东莱州人,清华大学教授,工学博士,从事智能交通系统和城市交通规划与管理研究。

引用格式:李瑞敏,戴晶辰. 自动驾驶影响下的出行行为研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(3): 41-54.

Citation: LI Rui-min, DAI Jing-chen. Review on impact of autonomous driving on travel behaviors[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(3): 41-54.

attributes are key influencing factors. Taking into account of different research objects, scenario design, and analysis methods, the influence of the factors such as gender, age, vehicle license holding, and family structure on travel behaviors remains to be examined. There is great uncertainty and heterogeneity in people's perceptions of the ways and benefits of the use of travel time in the era of autonomous driving, and there is a great need for theoretical models to further discuss the potential change of the use of travel time. Based on the limitations of existing studies on the impact of autonomous driving on travel behaviors, several future improvement directions are provided, including establishing standardized description of autonomous vehicles, enriching data collection methods, carrying out horizontal and longitudinal comparative studies, strengthening the consideration of the heterogeneity of influencing factors, and identifying the interaction mechanism among various travel behaviors. 3 tabs, 3 figs, 54 refs.

Key words: intelligent transportation; autonomous driving; travel behavior; mode choice; use of travel time; travel demand estimation; review

Author resume: LI Rui-min(1979-), male, professor, PhD, lrmin@tsinghua.edu.cn.

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (2019YFB1600100)

0 引 言

近年来,自动驾驶汽车(Autonomous Vehicle, AV)逐渐成为国内外关注的热点话题和重要研究内容。根据以往新兴技术的发展规律,有研究^[1]预计到2045年,AV的销量将占到汽车销量的50%,并且有40%的汽车出行是用AV完成的。目前,汽车制造商已经向市场推出带有自动驾驶功能的汽车,政府、企业和研究机构也相继在公共道路上开展了自动驾驶巴士和自动驾驶出租车的试点运行^[2]。AV的使用有望减少交通事故,缓解交通拥堵,提高能源效率,改善旅行体验以及增强弱势群体的出行总需求^[3-5]等,但这些益处能否真正实现在很大程度上取决于民众是否以及如何使用AV。

目前,国内外学者已针对该领域进行了相关综述研究。Keszei^[6]通过文献综述将影响自动驾驶汽车接受度的因素归纳总结为人格特征、情绪状态、感知、社会环境和描述性变量五类;Spence等^[7]从运动行为(体育活动、久坐和睡眠)、出行方式选择、环境(停车、土地利用、城市扩张等)等方面综述了预期的变化,指出现有研究表明,在大多数发达国家,AV将影响人们的模式选择和居住环境,从而导致步行减少,久坐增加。还有学者从行人的角度综述了有关行人对自动驾驶的接受度和交互活动的研究^[8]。近年来,国内亦有学者开始综述相关内容。唐立等^[9]从自动驾驶公众接受度的定义与分类、数据采集和分析方法、关键影响因素及其作用等方面进行了系统综述;秦波等^[10]借助涟漪模型分析框架

梳理了AV对城市交通、空间形态与土地利用,以及经济、社会、环境带来的影响。然而,在自动驾驶技术将如何对出行者具体的出行行为产生影响方面,尚缺乏针对性的综合性研究分析。

出行行为是指出行者在出行过程中的一系列决策过程及表现,包括是否出行、出行时选择的出行方式、出行路线选择、出发时间选择等。本文全面检索了有关高等级自动驾驶(L4或L5级)影响下的出行行为的研究文献,以数据可靠性、研究相关度、结果贡献性等方面为准则选取了相关论文。由于基于Agent和出行需求模型的研究是以假设的出行行为变化作为输入,缺少从受访者的角度获取的关于出行行为变化的信息,因此,本文进一步排除了采用该类方法的论文。虽然目前涉及自动驾驶的出行行为研究的文献类型较多,但考虑到研究成果的可靠性和相关研究的可比较性,本文最终选择从小汽车出行总需求估计、出行方式选择、在途时间利用方式三方面进行了综述与分析,总结了相关研究的数据基础与研究方法,归纳了影响出行方式选择的关键因素,进而指出了目前研究进展中存在的问题,并给出该领域的未来发展趋势。

1 自动驾驶对小汽车出行总需求的影响研究

AV在很大程度上降低了机动化出行对于年龄和身体状况的限制,为老年人、非驾驶人和未成年人等的单独出行提供了便利,因此,可能导致未来基于小汽车出行的总量的增加。

1.1 研究进展与结果

现有研究通常采用车辆行驶里程 (Vehicle Miles Traveled, VMT) 来衡量自动驾驶技术对小汽车出行总需求的影响,同时,基于出行调查数据并结合一些未来时期的出行行为假设探求 VMT 等的变化(表 1)。Brown 等^[11] 基于 2009 年美国家庭出行调查 (National Household Travel Survey, NHTS) 和 2003 年自由旅行的调查数据,假设在 AV 普及的环境下 16~85 岁年龄段的人都按照 40 岁年龄段的人的方式出行,则整体的小汽车 VMT 将增加 40%;基于 2009 年 NHTS 的数据和对 18~39 岁的成年人尚未拥有驾照的原因和相应比例的调查^[12],Sivak 等^[13] 假设因生活太忙、患有残疾、没学过或者正在学开车、法律问题而无法开车的人在自动驾驶的环境下能够正常使用小汽车,通过增加这类人群的小汽车出行需求发现引入 AV 将使 18~39 岁的成年人的小汽车 VMT 增加 10.6%;Harper 等^[3] 对目前出行流动性较差的驾驶人、老年人和因身体状况无法开车的人群可能增加的出行需求做出了不同的假设,应用于 2009 年 NHTS 数据后发现,美国 19 岁及以上人口的总小汽车 VMT 将增加 14%;Wadud 等^[14] 分析了减少的出行总费用和新增的出行人口对小汽车出行总需求的变化,利用 VMT 与总出行成本之间的弹性关系,假设当燃油费、保险费和旅行时间价值降低时,低等级和高等级的 AV 将分别使小汽车的 VMT 增加 4% 和 60%,而对于以往服务不足的人口,基于 2009 年 NHTS 数据,根据 44~62 岁人群 VMT 线性拟合的外推与 62 岁以上人群实际的 VMT 之间的差异,计算得到整体的小汽车 VMT 将增加 2%,而如果假设未来 62 岁以上人群的 VMT 与当前 62 岁人群的 VMT 相同,则整体的小汽车 VMT 将有可能增加 10%;Harb 等^[15] 为 13 名受访者提供了一周的免费司机服务,通过对比试验前后的出行行为,结果显示人们乘车出行的次数平均增加了 58%,并且会安排 AV 单独完成护送家人朋友等活动,由此也将导致 VMT 的增加;Pudane 等^[16] 于 2017 年在荷兰进行了 5 个焦点小组讨论,总共招募了 27 名日常通勤者,结果显示人们对于日常出行需求是否会增加的观点持不同的态度,但许多参加者指出,考虑到 AV 使人们可以接受更远的活动距离、更频繁的长途旅行,以及在长途旅行中用 AV 代替飞机和火车,人们非必需的出行需求可能增加。

基于上述研究成果,可以看到因为 AV 的出现

表 1 自动驾驶对小汽车出行总需求的影响

Table 1 Impact of autonomous driving on total vehicle travel demand

文献	数据基础	研究方法	主要结论
Harper 等 ^[3]	2009 NHTS	需求假设	19 岁及以上人群 VMT 增加 2%~14%
Brown 等 ^[11]	2009 NHTS	需求假设	16~85 岁人群 VMT 增加 40%
Schoettle 等 ^[12-13]	自拟问卷调查和 2009 NHTS	需求假设	18~39 岁人群 VMT 增加 10.6%
Wadud 等 ^[14]	2009 NHTS	弹性分析与需求假设	出行费用减少使整体 VMT 增加 4%(低等级 AV 情景)或 60%(L4 级 AV 情景),由新增出行 人口带来的出行使 VMT 增加 2%~10%
Harb 等 ^[15]	受访者	描述统计	
Pudane 等 ^[16]	焦点小组成员	定性分析	

能够为无法驾车的人提供出行便利,因此有望增加城市的小汽车出行总需求,但具体 VMT 的增加量(从 2% 到 60%)将取决于学者们的研究假设。

1.2 数据基础与研究方法

针对当前服务不足人口的潜在出行需求进行分析的研究,大多从人们当前的出行行为特征出发,利用国家相关部门和地方政府统筹展开的居民出行调查数据,分析得到当前不同年龄、不同身体状况、以及是否持有驾照等人群的出行特点^[3,11,13-14]。之后,通过假设分析和计算来得到 AV 的推广应用对小汽车出行总需求的影响。然而,此类方法带有主观性较强的假设,导致不同研究的结果差异较大,可靠度方面受到质疑。例如很多研究假设由于有了 AV,老年人出行可能更多使用小汽车,但是也有研究对比发现,相对于 AV,老年人更倾向于选择传统的交通方式^[17]。另有研究采用自然主义试验法来比较人们在使用 AV 前后的出行变化^[15],或是开展定性访谈来归纳推导人们的见解^[16],进而探讨对小汽车出行总量的影响。但较小的样本量、抽样的偏差等使得这类研究结论的可靠性也存在一定的局限性。

现有的研究预计或假设年龄越大、身患残疾、因服用药物而无法开车、没有驾照的人在将来 AV 的支持下会产生更多的小汽车出行总需求。随着有研究深入分析了自动驾驶技术将带来的活动方式的变化,是否愿意接受更长的出行距离、展开更频繁的出行、进行更多的休闲和长距离出行、改变出行时间安排会对全体人群的出行需求产生影响^[18],因此,对

服务不足人口的需求假设还需进一步细化,对当下依靠小汽车出行人口的活动方式改变而带来的出行总需求变化等方面还有待探讨。

2 自动驾驶对出行方式选择的影响研究

随着 AV 和共享经济的发展,预计未来将衍生出多种新型的交通出行方式,出行者在现有出行方式与新型出行方式之间的选择将会影响到各类交通工具的使用强度,进而影响交通运行状态,该领域近年来亦成为关注的焦点。

2.1 研究进展

目前的研究中呈现给受访者的出行方式选择集可以体现不同交通方式间的权衡,根据现有研究的侧重点,出行方式选择集的组成可分为两类(表 2)。一是分析自动驾驶技术对各类基于小汽车的出行方式选择行为的影响,而不考虑其他的出行方式。Haboucha 等^[19]采用嵌套 Logit 模型研究了以色列和北美民众未来在私人普通汽车、私人自动驾驶汽车(Private Autonomous Vehicle, PAV)和共享自动驾驶汽车(Shared Autonomous Vehicle, SAV)之间的选择行为,结果显示在所有的选择场景中,44%的选择结果是私人普通汽车,32%是 PAV,24%是 SAV,早期的自动驾驶技术使用者很可能是年轻人、学生、受过更多教育和通勤时间较长的人;Etzioni 等^[20]研究了 6 个欧洲国家民众对私人普通汽车、PAV 以及 SAV 的选择行为,发现大约 70%的民众仍倾向于私人普通汽车。虽然私人普通汽车

是调查中的首选出行方式,但民众对于私人普通汽车的选择比例在不同的研究中存在差异。可能的原因一是学者们对选择场景的构建有所不同,Haboucha 等^[19]为受访者提供了不同交通方式的购买费用、单次出行费用和停车费用等,而 Etzioni 等^[20]则为受访者展示了不同交通方式针对某次出行的费用、时间以及其他乘客的数量与性别;二是调查的对象对 AV 的态度可能存在地区差异。此外,部分学者还根据运营模式将 SAV 进行细分。例如,Saeed 等^[17]研究了 1922 名美国民众对于私人普通汽车,PAV,租用自动驾驶汽车(例如 Zipcar 和 Car2Go)以及 SAV(例如 Uber 和 Lyft)4 种出行方式的偏好,通过随机参数 Logit 模型分析了社会人口属性、出行属性、居住环境属性等因素的影响。

二是考虑了自动驾驶对包含小汽车、公共交通、出租车、骑行、步行乃至飞机等各类交通方式在内的影响。Wicki 等^[21]探讨了受访者在不同出行成本、出行费用、乘客数量和天气状态下对于自动驾驶小巴、步行及租用自行车之间的选择行为;Winter 等^[22]则考虑了各种交通方式的服务水平(例如出行费用、停车费用、车内旅行时间、等待时间、停车时间、步行时间等)对受访者在私人普通汽车、租用普通汽车、出租车、公交车及 SAV 间选择的影响,同时预测了未来通勤场景下各种交通方式的分担率。

在研究自动驾驶对人们出行方式选择的影响时,选择场景的选取将直接影响受访者的回答。有些学者会明确特定的出行场景,例如 37%的学者探讨自动驾驶对人们日常出行方式选择的影响,同时也有部分学者针对特定场景展开了调查(表 2)。Yap 等^[23]探讨了受访者对自动驾驶技术的态度等因素对其采用 AV 作为公共交通“最后一公里”交通方式选择行为的影响,结果显示对“自动驾驶汽车的可持续性”和“自动驾驶汽车的信任”持更积极态度的受访者也更倾向于选择 AV;Cai 等^[24]同样针对“最后一公里”场景,分析了三类需求响应型自动驾驶服务的使用情况,发现大约 31%的公共交通用户会考虑采用自动驾驶服务完成“最后一公里”的出行,大约 57%的司机会放弃开车;由于自动驾驶技术增加了长距离出行中选择汽车的可能性,Gurumurthy 等^[25]考虑了 2 588 名美国民众在长距离出行中使用私人普通汽车、PAV、SAV 和飞机之间的情况,发现 SAV 在长途商务旅行中尤其受欢迎。还有学者分析了自动驾驶技术对通勤出行^[22,26]和休闲出行^[21,27]中出行方式选择的影响,同

表 2 关于出行方式选择代表性文献的分类

Table 2 Classification of representative literatures on travel mode choice

分类项目	类别	文献数量	文献比例
选择集的组成	全部为小汽车出行方式	7	0.26
	包括各类交通方式	20	0.74
选择场景的选取	日常出行	10	0.37
	最后一公里	3	0.11
	长距离出行	2	0.07
	通勤出行	7	0.26
	休闲出行	3	0.11
	其他	8	0.30
特定问题的关注	在途利用方式	3	0.11
	交通管理政策	1	0.04
	有无驾驶人	1	0.04
	监控方式	1	0.04
分析文献总数		27	

时也有部分学者会脱离具体的选择场景直接询问受访者对出行方式的偏好^[28-29]。

除自动驾驶技术本身会给出行方式选择带来的影响以外,政策管理和监管运营等外部因素也会影响人们的出行行为,有学者针对这些特殊因素对出行方式选择行为的影响进行了探讨。Carrese等^[30]考虑了不同的交通管理政策、服务类型及在途时间利用方式对通勤者方式选择的影响,发现对采用AV的最大促进因素是采用设立专用道的交通管理政策;Abe等^[31]研究了车上人员监控、基于人的远程监控、基于系统的远程监控3种监控方式对自动驾驶出租车使用的影响,结果表明出行成本和出行时间比监控方式的影响更重要;Pakusch等^[28]通过定性访谈对比了人们在普通出租车和自动驾驶出租车之间的偏好,并着重分析了人们对出租车司机存在与否的看法。

2.2 数据基础与研究方法

2.2.1 调查方法

出行方式选择的研究数据基本来自陈述偏好(Stated Preference, SP)调查,只有一项研究采用了定性访谈方法^[28]。目前,大部分SP调查是通过网站、电子邮件、社交软件等方式在网络上发放,数据的可靠性方面有时会存在问题。由于受访者基本没有乘坐过AV,为了让受访者能够理解问卷内容并设想未来的变化,问卷通常采用文字、图片、视频等方式向受访者传达有关自动驾驶的信息。然而这些信息无法在短时间内转化为受访者对AV的客观认知和感性体验,因此,回答的准确性也有待商榷。为了解决网络调查问卷中存在的问题,Cai等^[24]和黄浩^[32]采取了网络调查与线下调查相结合的调查方式,Wicki等^[21]面向了解当地正在进行自动驾驶路测的民众展开调查,Piatkowski^[33]则先邀请受访者在停车场内的封闭线路上体验大约10 min的自动驾驶小巴,随后再展开问卷调查,但依然无法解决受访者缺乏自动驾驶汽车试乘经历和体验的问题。

2.2.2 问卷设计

SP问卷的内容主要包括受访者的社会人口属性、家庭信息、对自动驾驶技术的描述、选择场景、对自动驾驶的态度和看法、用户偏好和个性以及与研究目标相关的特定问题等方面。其中,选择场景的设计是问卷的关键内容。选择场景的背景通常基于一次虚拟的出行,当研究者给出各种交通方式的出行属性时,受访者将根据自身情况进行权衡并作出选择。考虑到每位受访者日常出行的模式有所差异,部分研究基于受访者陈述的一段出行来构造选

择场景以丰富选择场景的多样性^[20,31,34-35]。也有研究将现实生活中的典型道路作为选择场景以帮助受访者作出更真实的回答^[21,24]。选择场景中的选择肢通常对所有的受访者是固定不变的,但有些学者也进行了更精细化的设计。Cai等^[24]根据受访者是否是驾驶人以及是否有定期的开车行为,将受访者分为开车通勤用户和公共交通用户,进而为两类用户提供不同的选择肢来研究在“最后一公里”出行中使用AV的行为;Gao等^[36]根据共享汽车是否能够自动驾驶以及是否向受访者刻意提及多任务处理的能力将受访者分为了4组,从而构造了4个私人普通汽车与共享汽车的选择场景。

在问卷的问题设计方面,为了体现受访者对选择场景的反应,大多问卷采用了离散选择的形式,也有学者尝试采用了李克特量表^[29,31,33,37]、配对比较^[38]和视觉模拟评分表^[39]等方式衡量受访者在当前和未来出行方式之间的选择行为。受制于缺乏AV实际乘坐经历,通过精细化设计的问卷能够更贴近受访者真实的出行环境,帮助受访者更好的想象与类比未来自动驾驶场景,减少作答时的随意性。

2.2.3 研究对象

现有文献中所涉及到的研究对象可分为3类。1)普通的民众和居民,研究中对受访者没有特殊的要求^[19,22,25]。2)有低限制条件的受访者,最基础的限制条件是对年龄的要求,例如Booth等^[29]将受访者年龄限制为不小于16岁,Abe等^[31]将受访者的年龄限制在20岁到74岁之间。部分研究者还附加了其他的限制以期受访者的回答更贴近现实。例如Saeed等^[17]在成年人的限制基础上,增加了受访者应该以驾驶人或者乘客的身份使用车辆去上班或上学的要求。其他的限制条件还包括使用汽车的频率^[27]、驾照持有^[27]、出行频率^[23]等。3)有高限制条件的受访者,例如了解所在城市正在进行自动驾驶路测的居民^[21]和体验过自动驾驶的居民^[33]。在目前的研究中,受制于样本采集难度、研究地区现状等条件的限制和研究的需求,大多研究选取的对象都是普通的民众和有低限制条件的受访者。

2.2.4 分析方法

在分析调查问卷时,现有研究通常采用描述性统计分析^[19,24,38]、相关性分析^[23]、回归分析^[29]、因子分析^[19,27]、各类离散选择模型^[22,25,36]和专题分析^[28]方法来描述结果和检验变量对出行行为的影响。在此基础上,根据特定的研究目标和研究问题,有学者应用其他的研究方法进行深入探讨。Krueger等^[34]

表 3 关于出行方式选择代表性文献的数据基础与研究方法

Table 3 Data foundations and research methodologies of representative literatures on travel mode choice

文献	调查方式	研究对象	选择场景的来源	研究方法
Saeed 等 ^[17]	在线问卷调查	1 922 名美国民众(成年人,以驾驶人或者乘客的身份使用汽车去上班或上学)	虚拟场景	随机参数 Logit 模型
Haboucha 等 ^[19]	在线问卷调查	721 名居住在以色列和北美的民众	虚拟场景	因子分析与嵌套 Logit Kernel 模型
Etzioni 等 ^[20]	在线问卷调查	1 669 名来自 6 个不同国家的民众	基于受访者陈述的一段出行	混合多项 Logit 模型
Wicki 等 ^[21]	在线问卷调查	773 名瑞士沙夫豪森州民众(了解自动驾驶巴士路测)	现实生活中的 一段出行	综合选择与潜在变量模型
Winter 等 ^[22]	在线问卷调查	796 名荷兰民众	虚拟场景	带有潜在类的嵌套 Logit 模型
Yap 等 ^[23]	在线问卷调查	761 名荷兰民众(年满 18 岁,每月至少出行 2 次)	虚拟场景	因子分析与混合 Logit 模型
Cai 等 ^[24]	在线问卷调查和 实地问卷调查	1 477 名新加坡民众	现实生活中的 一段出行	Logit Kernel 模型
Gurumurthy 等 ^[25]	在线问卷调查	2 588 名美国民众	其他	多项 Logit 模型
Krueger 等 ^[26]	在线问卷调查	512 名悉尼的通勤者(成年,必须有工作或正在上学; 每周至少通勤 3 次;必须是租房或有住房抵押贷款)	虚拟场景	混合多项 Logit 模型
Ashkrof 等 ^[27]	在线问卷调查	663 名荷兰民众(年满 18 岁,持有驾照,每月至少 使用一次汽车)	虚拟场景	探索性因子分析和带有面板 效应的混合 Logit 模型
Pakusch 等 ^[28]	定性访谈	25 名德国的千禧一代	其他	专题分析
Booth 等 ^[29]	在线问卷调查	1 624 名澳大利亚民众(年龄 16 岁及以上)	其他	普通最小二乘多元回归分析
Carrese 等 ^[30]	在线问卷调查	201 名罗马民众	虚拟场景	多项 Logit 模型
Abe 等 ^[31]	在线问卷调查	1 962 名日本民众(20~74 岁)	基于受访者陈述 的一段出行	面板混合有序 Logit (OL) 模型
黄浩 ^[32]	在线问卷调查和 实地问卷调查	558 名中国民众	虚拟场景	多指标多因子(MIMIC) 模型与混合 Logit 模型
Piatkowski ^[33]	在实地体验前后 填写在线问卷	551 名内布拉斯加州民众	其他	二元 Logistic 回归模型
Krueger 等 ^[34]	在线问卷调查	435 名澳大利亚民众	基于受访者陈述 的一段出行	k -means 聚类法与混合 Logit 模型
Wang 等 ^[35]	在线问卷调查	1 142 名新加坡民众(20~85 岁)	基于受访者陈述 的一段出行	回归分析与混合 Logit 模型
Gao 等 ^[36]	在线问卷调查	502 名成年美国民众	虚拟场景	混合 Logit 模型
Abe ^[37]	在线问卷调查	2 300 名日本民众(0~74 岁,居住在距东京都 最近的火车站 1~5 km 的范围内)	基于受访者陈述 的一段出行	多项 Logit 模型和混合 Logit 模型
Pakusch 等 ^[38]	在线问卷调查	302 名德国民众	其他	Bradley-Terry-Luce (BTL)模型
Kim 等 ^[39]	邮寄纸质版问卷并 提供在线问卷链接	2 890 名美国佐治亚州民众	虚拟场景	因子分析和潜在类聚类分析
Zhou 等 ^[40]	在线问卷调查	1 433 名澳大利亚民众	基于受访者陈述 的一段出行	随机参数 Logit 模型
Alhajyaseen 等 ^[41]	在线问卷调查	315 名卡塔尔民众	虚拟场景	多项 Logit 模型
Etzioni 等 ^[42]	在线问卷调查	714 名成年以色列民众	虚拟场景	探索性因子分析与 MIMIC 模 型和潜在类多项 Logit 模型
Sweet ^[43]	在线问卷调查	393 名中国民众	虚拟场景	k -means 聚类法与 混合 Logit 模型
姚荣涵等 ^[44]	在线问卷调查	1 684 名住在大多伦多和汉密尔顿地区的民众 (有工作,通勤上班以及家庭保有汽车)	虚拟场景	混合 Logit 模型

根据受访者当前使用各种交通方式的频率采用 k -means 方法将人们的出行模态进行分类,从而减少了纳入模型的因变量,便于分析当前出行风格对未来选择行为的影响;Kim 等^[39]通过潜在类聚类分析

划分了具有不同 AV 使用倾向的人群,从而得到了各类人群的市场划分比例和社会人口属性特征;Wang 等^[35]将基于前景理论的行为经济学模型与离散选择模型结合,为理解风险偏好如何影响人们的

方式选择行为提供了见解;Zhou等^[40]在离散选择模型的基础上,采用仿真分析方法,进一步检验了社会人口属性变量的边际效应影响,并发现了人们对SAV的偏好存在异质性。通过采用这些方法,一方面可以提取具有代表性的因子,减少因变量的数量,另一方面可以在分析变量间关系的基础上丰富研究

的结果,为政府部门、出行服务商以及交通规划师提供政策制定和运营管理的建议。

2.3 影响出行方式选择的关键因素与研究结果

影响出行方式选择的关键因素可以分为车辆服务和出行属性、社会人口和家庭属性、出行习惯属性、居住地和环境属性、个人心理和偏好属性五大类(图1)。

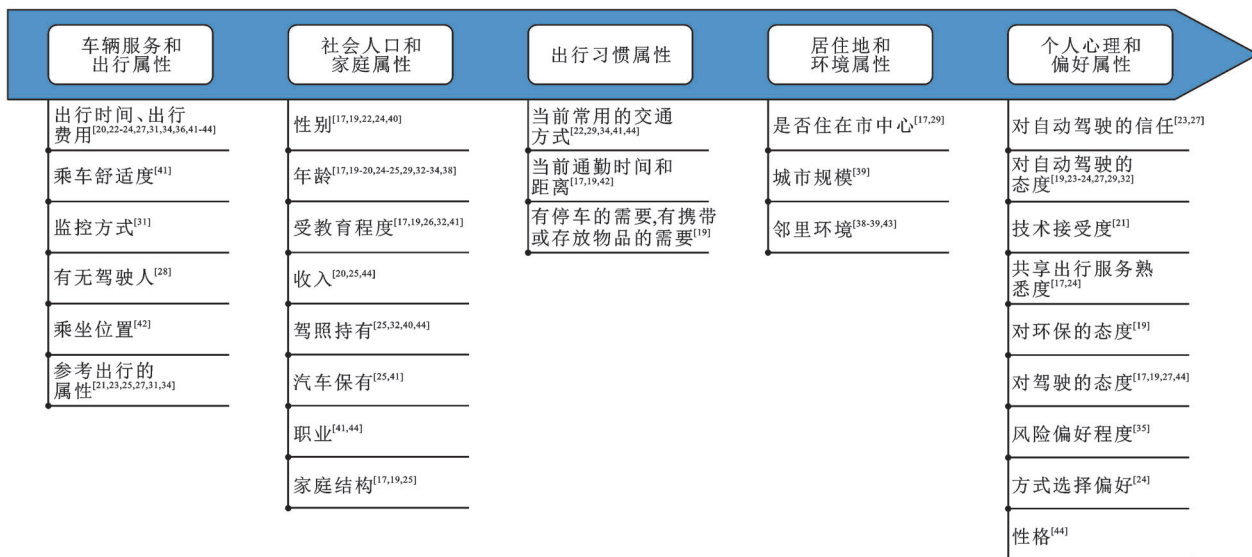


图1 影响出行方式选择的关键因素与相关代表性文献

Fig. 1 Key factors affecting travel mode choice and related representative literatures

2.3.1 车辆服务和出行属性

车辆服务属性主要包括出行费用、出行时间、舒适度、监控方式、有无驾驶人、座位位置等。多项研究表明AV的出行费用和出行时间会显著影响人们的方式选择^[23-24,41]。此外,PAV的沉没成本(例如购车费)和SAV的服务年费的影响可能存在地区差异,例如Haboucha等^[19]的研究结果显示以色列人相比北美地区居民更关心购车费,而更不关心共享服务年费。在乘车舒适度方面,Alhajyaseen等^[41]发现舒适度对私人普通汽车、PAV、SAV和公共交通的选择都有显著影响,并且对SAV的影响最大;Abe等^[31]发现监控方式会影响人们对于AV的接受度,相比于车上人员监控,人们更不喜欢基于人或者系统的远程监控,但在实际的出行方式选择中3种监控方式的影响都不显著。而在有无驾驶人方面,Pakusch等^[28]发现德国千禧一代不太需要出租车司机提供的额外服务,同时考虑到自动驾驶出租车将更便宜,在当前使用普通出租车出行中,大多数受访者表示更愿意采用自动驾驶出租车;Etzioni等^[42]发现坐在车辆后排中间位置会降低不喜欢与陌生人一起乘车的受访者采用允许合乘的SAV的可能性。

如果选择场景的背景是基于受访者陈述的一段出行(以下简称为参考出行),则该参考出行的属性也会影响受访者的选择行为,包括在参考出行中使用的交通方式、出行距离、出行目的、出行天气等。Krueger等^[34]发现在参考出行中开车或乘坐公共交通出行的受访者相对于私人普通汽车和允许合乘的SAV,更有可能选择不允许合乘的SAV;Abe等^[31]发现在参考出行中乘坐公共汽车和出租车用户比步行、使用铁路、开车、骑自行车的人更可能用自动驾驶出租车来代替以往的出行方式;而在40 km的市内长距离出行时,Ashkrof等^[27]的研究结果显示人们更喜欢使用自动驾驶服务而不是普通汽车和公共交通。但另有研究表明出行距离大于500 mile时,人们更容易选择飞机而不是私人普通汽车和AV^[25]。针对出行目的,在私人目的的出行中,人们更倾向于选择隐秘性强的PAV和私人普通汽车,而在休闲和商务出行中则更有可能选择SAV^[25,27]。在寒冷多雨的情况下,即使是一段750 m的行程,受访者相对于主动交通(指自行车和步行)更喜欢自动驾驶小巴^[21]。此外,Yap等^[23]还研究了乘坐火车的等级对下车后“最后一公里”出行方式的选择影响,结果显示AV对头等舱旅客的吸引力比对二等座旅客的吸引力更大。

2.3.2 社会人口和家庭属性

社会人口和家庭属性主要包括性别、年龄、受教育程度、收入、是否持有驾照、是否保有车辆、职业和家庭结构等方面。

在性别方面,相比于女性,有研究发现男性更愿意使用 AV^[17,40],也有研究认为性别差异对出行方式选择的影响不显著^[22],或者仅在性别差异明显的地区(例如以色列)存在男性比女性更愿意使用 SAV 的现象^[19]。此外,还有研究指出无论性别如何,个体针对 SAV 的选择存在很强的偏好异质性,即喜欢或不喜欢 SAV 的男性数量大致相同^[40]。由此可见,对性别的影响还有待进一步研究。

在年龄方面,部分研究发现同时存在 PAV 和 SAV 的情况下,老年人更可能使用普通汽车^[17,19-20,25]或者公交车^[24,29],年轻人则更倾向于 SAV^[17]。然而,也有研究发现老年人相对于年轻人更倾向于选择 SAV^[32],还有研究认为自动驾驶和共享出行对各个年龄段的人都具有吸引力^[38],这表明年龄对方式选择的影响还需要有更多的研究来检验。

在受教育程度方面,受过高等教育的受访者更倾向于选择 AV^[17,26],可能对 PAV 和 SAV 拥有相同的选择偏好^[19]或者选择 SAV 的可能性更大^[41]。这可能与受教育程度与对 AV 的了解程度有一定的相关性有关。

在收入方面,相比于私人普通汽车,Etzioni 等^[20]发现发达国家(例如英国和冰岛)中家庭收入较高的个人往往更喜欢 AV,但 Gurumurthy 等^[25]发现在长距离出行中,相对于私人普通汽车、PAV 以及飞机,不论家庭收入水平如何,人们更倾向于 SAV,这可能是由于 SAV 是最经济的出行方式。

在驾照持有和车辆保有方面,Gurumurthy 等^[25]发现在长距离出行中,拥有驾照和拥有汽车的人更可能选择私人普通汽车;Zhou 等^[40]等发现无论是否持有驾照,个体针对 SAV 的选择存在很强的偏好异质性,这可能是由于 SAV 的概念很新颖,人们暂时还无法理解和预测其带来的影响;Alhajyaseen 等^[41]发现家庭中没有汽车会增加人们使用公共交通和 SAV 的可能性。

在职业方面,当私人普通汽车、PAV、SAV 和公共交通四种方式可用时,Alhajyaseen 等^[41]的研究显示全职工作会增加人们选择 PAV 和私人普通汽车的可能性,学生和失业人员更喜欢使用 SAV,家庭主妇则更不喜欢使用公共交通和 PAV。

在家庭结构方面,Haboucha 等^[19]的研究结果

显示当家庭中有 2 个及以上孩子时会增加人们选择 SAV 的可能性,但 Saeed 等^[17]发现随着家庭成员数量的增加,人们使用 PAV 的可能性会增加。导致研究结果存在差异的原因可能是学者们对于 SAV 的描述有所不同,前者从共享服务使用年费、单次出行费用和停车费用来描述 SAV,而后者则根据服务模式细分为基于自动驾驶技术的租车服务和共享服务。由此亦可以看出调查问卷的设计和描述也会对最后的结果产生影响。

2.3.3 出行习惯属性

出行习惯属性主要包括当前常用的交通方式、当前通勤时间和距离等。在常用的交通方式方面,经常使用多种交通方式的人更容易选择 SAV^[22,34],经常步行和使用公共交通的人更倾向于选择 AV 来代替这两种出行方式^[29],而经常使用私人普通汽车的人则更可能依旧选择私人普通汽车出行^[41]。Krueger 等^[34]发现当前使用公共交通的用户更容易选择 SAV,但 Winter 等^[22]则持相反的意见。结论存在差异的可能原因是选择集的设计不同;Krueger 等^[34]关注于受访者是否会放弃当前的出行方式而选择 SAV;Winter 等^[22]则研究受访者在私人普通汽车、租用普通汽车、出租车、公交车、SAV 间的偏好。在当前通勤时间和距离方面,通勤时间较长的人倾向于使用 PAV^[17,19],这可能是因为他们更能体验到在长途旅行中从事多任务活动的好处。此外,Haboucha 等^[19]还发现当在出行路上需要停车办事的次数越多,就越有可能使用私人普通汽车,并且越是需要用自己的车来存放或携带物品,也就越不容易使用 SAV。

2.3.4 居住地和环境属性

在城市中的居住位置同样会对人们的出行方式选择产生显著影响。在普通私人汽车、PAV、租用自动驾驶汽车以及 SAV 的选择中,Saeed 等^[17]发现当前居住在市中心的受访者更有可能使用 SAV,这可能是由于居住在人口密集的市中心更容易享受共享的出行服务,同时也避免了在市中心的停车和拥堵问题;Booth 等^[29]发现住在非都市区的受访者更有可能用 AV 替代公共交通出行,这可能与非都市区域的公共交通服务频率较低、站点覆盖范围不足有关;Kim 等^[39]在分析受访者对 AV 与各类交通方式的偏好时引入两种居住地和环境变量,分别是城市规模变量和邻里环境变量,研究发现住在人口规模大的城市(亚特兰大)和住在城市/郊区的受访者更可能派遣没有乘客的 AV 去独自办事。考虑到居住地和环境属性对方式选择行为的影响大部分能够

通过出行习惯属性来反映^[43],相对其他影响出行方式选择的因素,只有较少的文献在模型中引入了居住地和环境属性。

2.3.5 个人心理和偏好属性

个人心理和偏好属性包括对自动驾驶的信任、态度、熟悉度、认可度、技术接受度、技术精通度、对驾驶的态度、对环保的态度、对风险的态度、方式选择偏好和个人性格等。对自动驾驶的信任度越高,越能增加人们选择 AV 的可能性^[23,27]。对自动驾驶的态度越积极、越认可自动驾驶潜在的提高效率、提高可持续性的好处的受访者,也越可能选择 AV^[19,23,27,29]。相对于步行和骑自行车,对技术接受高或者对 AV 持有更积极态度的受访者也更愿意使用 AV^[21,29],而且环保意识越强烈的人越倾向于使用 SAV^[19]。

对驾驶的态度则可能产生不同的结果,Haboucha 等^[19]和 Ashkrof 等^[27]的结果显示喜欢开车的人更不愿意使用 AV,而 Saeed 等^[17]发现喜欢开车的人对 AV 的选择上存在显著的异质性。考虑到驾驶并不总是令人愉快和便捷的,特别是在与家人的长途旅行或休闲旅行的情况下,因此,人们对于 AV 的感受也可能不同。在风险偏好方面,心理

学风险偏好高的人相对于步行和公交车更倾向于采用 SAV,而相对于普通汽车和拼车则不太可能采用 SAV^[35]。在方式选择偏好方面,Cai 等^[24]发现看重便利性的司机更喜欢开车和坐公交车,而不是采用轨道交通与任一需求响应型自动驾驶服务相结合的出行方式。在性格方面,积极主动型的人比保守内向型的人更容易选择允许合乘的 SAV^[44]。

除上述 5 类关键影响因素外,其他影响出行方式选择的因素还包括交通管理政策和自动驾驶的体验等。如果设置自动驾驶汽车专用道,人们将更可能选择 AV^[30],而在城市中有过体验自动驾驶技术的经验也会增加人们选择 AV 的可能性^[21]。总体来看,车辆服务和出行属性以及社会人口和家庭属性是目前研究中考虑较多的关键因素,受限于数据获取的内容,居住地和环境属性尚未充分纳入模型,而个人心理和偏好属性还在持续的丰富完善中(图 2)。在对自动驾驶汽车对出行方式选择的研究中,由于研究对象、场景设计、分析方法等方面的差异,研究既有相似的发现也有不同的结果,对于性别、年龄等变量的影响还有待探讨,对相同变量在人群中异质性的影响还需要进一步检验。

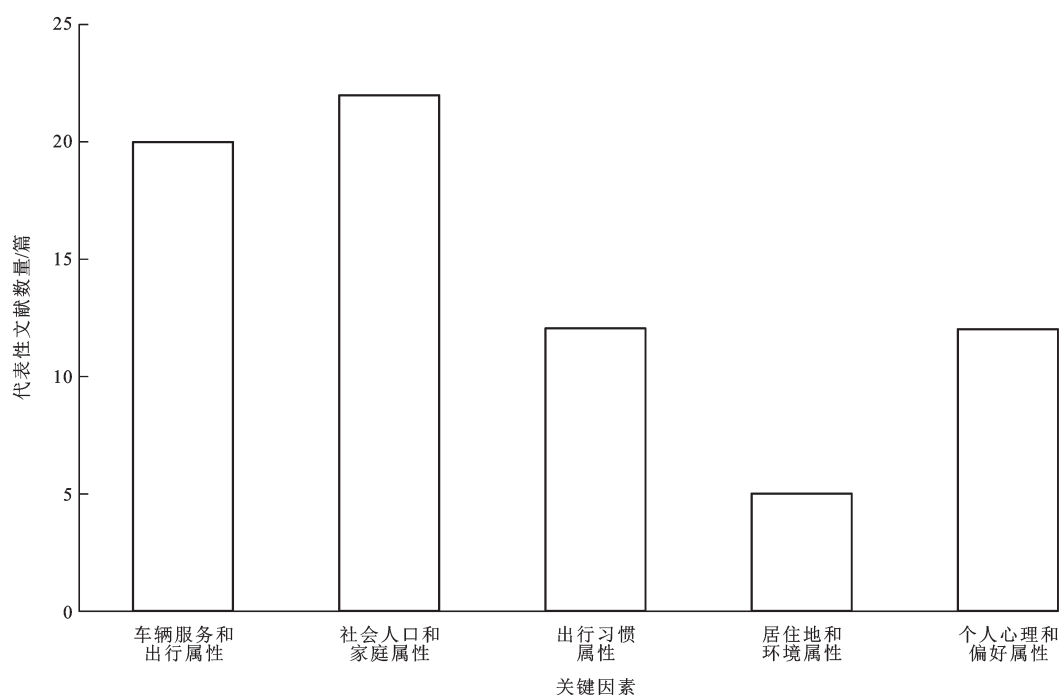


图2 出行方式选择代表性文献所考虑的关键因素的分布

Fig. 2 Distribution of key factors considered in representative literatures on travel mode choice

3 自动驾驶对在途时间利用方式的影响研究

AV 能够让原来的驾驶人在出行过程中从事除

驾驶之外的生产性活动(例如工作和阅读)与非生产性活动(例如放松和发呆等),这种出行途中的多任务处理能力有望让现在的驾驶人提高旅行时间的价值和效用^[45]。

3.1 研究进展与结果

21 世纪初期,在途时间利用和多任务处理能力的概念逐渐形成^[46]。当自动驾驶技术能够缓解与驾驶相关的压力和对注意力的需求,同时赋予在出行中进行除开车以外其他活动的可能性时,人们对在途时间的负面感知可能有所减少^[14,47]。然而,针对人们是否以及在多大程度上改变在途时间利用方式这一问题,目前的研究表明人们大多持保守的态度。Sivak 等^[48]通过调查发现约 62% 的美国人认为 AV 不太可能提高车内时间的生产率,其中,23% 的人表示他们不会乘坐 AV,36% 的人表示乘坐这样的车辆会非常担心并且只会看着路,还有 8% 的人因晕车等生理原因不会从事其他的车内活动;Bansal 等^[49]通过一项在德克萨斯州的调查发现人们认为自己最可能在 AV 上进行的活动是与其他乘客交谈(59.5%)和看着窗外(59.4%),而阅读(24.5%)和工作(17.4%)等生产性活动的可能性则相对较小;在 Cyganski 等^[50]调查的 1 000 名德国受访者中,发现只有 13% 的受访者强烈或者大致上认同在 AV 出行中工作是一项优势,进一步通过 Probit 模型分析男性、经常开车或坐火车、在出行方式选择时看重时间和别人看法、目前在公共交通出行中欣赏风景的受访者更倾向于认同未来在 AV 上工作是一项优势,然而经常以乘客身份使用小汽车、在火车和汽车上欣赏风景的受访者则持相反的观点。由此可见,在途时间利用的改变取决于人们对 AV 的接受度和信任度,同时也与当前的出行行为有关。

当 AV 改变了在途时间的利用方式后,人们每天从事各类活动的行程安排也可能相应改变。Pudāne 等^[51]提出了一个优化模型来研究 AV 对在途时间利用和活动顺序与地点的影响,并指出利用在途时间从事其他活动(例如午睡或者回复电子邮件),既可能增加出行(比如用节省的工作时间去游泳),也可能减少出行(在车内休息以减少回家的次数);Pudāne 等^[16]在荷兰进行了 5 个焦点小组讨论,讨论总共招募了 27 名日常通勤者,大多数参与者表示自动驾驶技术将使行程安排更高效,从而减轻时间压力,但也有些参与者指出他人更高的期望和更多可以完成的活动反而会增加压力。AV 对在途时间利用的积极效用还可能来自提高的主观幸福感。Singleton^[52]指出在 AV 时代,在途时间更可能转换为乘客切换社会角色和享受独处的私人空间的时间,这些“过渡时间”和“放空时间”将提高乘坐

AV 的主观幸福感。

此外,还有部分研究虽然没有明确询问受访者将如何在 AV 中利用在途时间,但在出行方式选择的研究中,通过计算旅行时间价值来间接观察受访者未来在途时间利用方式的改变。Yap 等^[23]的研究发现与私人普通汽车相比,人们愿意为减少在 AV 内的出行时间的支付意愿更强烈,这表明人们没有意识到在乘坐 AV 时进行其他活动的优势;Krueger 等^[26]则发现人们对旅行时间价值的看法不会因 AV 的出现而发生变化;Gao 等^[36]发现 SAV 的旅行时间价值高于普通共享汽车和私人普通汽车,但如果特意告知受访者在共享汽车时可以从事其他活动,则能够降低共享汽车的旅行时间价值,这一方面说明人们目前对自动驾驶技术还持存疑的态度,另一方面也表明未来人们有可能在 SAV 上从事其他活动来减少旅行时间的负效用。

综上所述,虽然 AV 允许人们从事更多类型的活动,但现阶段人们对 AV 的信任程度、是否充分意识到在途时间利用方式可能改变、是否会认同多任务处理是显著优势还存在较大的不确定性与异质性。

3.2 数据基础与研究方法

已有研究通常采用调查问卷和定性访谈等途径来获取有关人们对于出行时间利用方式的看法。数据获取的内容包括受访者的社会人口属性、当前的出行习惯、当前对于各种交通方式的在途时间利用方式、对 AV 的态度和感知、未来在 AV 上的时间利用方式等。在分析问卷结果时,现有研究通常采用描述性统计分析,其中只有一项研究采用了计量模型^[50]。定性访谈则是通过归纳法和演绎推导来得出相关结论。此外,亦有学者采用数学建模和案例计算来检验模型的有效性和论证出行时间利用方式改变的影响^[51]。虽然通过计算旅行时间价值能间接观察受访者在途时间利用的改变情况,但由于人们对自动驾驶技术的认识还不充分,研究结果无法充分体现潜在的在途时间利用方式。

总体而言,如何利用在途时间会受到车辆和出行条件、身体状况以及社会人口属性等因素的影响。随着自动驾驶技术的进步和体验自动驾驶技术的机会增多,还需要更深入了解人们对在途时间利用的看法和变化规律。

4 存在的问题和未来研究方向

虽然近年来关注自动驾驶对出行行为的影响的研究日益增多,但由于自动驾驶的大规模运行尚未

出现,已有研究受制于各种条件限制,未来还需要在多个方面有所改进。

4.1 目前的研究中数据采集方式相对单一,受访者对自动驾驶的了解有限

一方面现有研究绝大多数采用问卷调查的方法来收集数据,受到有限的作答时间和信息量的限制,受访者对自动驾驶的认知相对有限,另一方面目前在道路上实际运行自动驾驶车辆非常少,有试乘经历的出行者就非常罕见,因此,目前众多研究中的受访者受制于对自动驾驶的切身认知无法很好的作答关于未来出行方式的改变情况。此外,已有研究指出对自动驾驶汽车的不同描述也会引起人们不同的心理反应,例如与“autonomous”一词相比,“self-driving”一词更容易引起受访者关于担忧的反应^[53],因此,一方面需要在网络问卷中建立规范可靠的描述来向受访者介绍 AV,另一方面随着全球各地陆续开展关于自动驾驶汽车的现场试验、道路测试和出行服务,通过调查真实体验过 AV 的民众,更便于受访者获取有关 AV 的知识和感受,从而有望得到更加真实可靠的回答。

4.2 目前研究使用样本的组成偏于城市化地区,样本代表性有待提高

现有研究多是基于城市化地区进行,较少关注自动驾驶对乡村居民出行的预期影响。由于城市和乡村在道路结构和交通服务方面存在较大差别,自动驾驶对乡村居民的影响可能呈现与城市居民不同

的趋势,未来还需要进一步探索城市居民和乡村居民的不同出行行为变化。此外,部分研究是在单一地区针对当地民众进行调查,调查样本较难代表地区整体的社会人口属性^[26,35-36]。虽然有学者指出在自动驾驶发展的早期阶段人们的观点和认识会不断发生变化,进行大规模的调查优势是有限的^[54],但数据分析需要足够大样本量和丰富的样本结构才能得出稳健的结论,未来的研究可以考虑样本加权、配额抽样、二次抽样、滚雪球抽样等方法来提高样本的代表性。

4.3 缺乏不同国家、地区之间的结果对比,出行行为随政策、时间的变化尚未探讨

目前,关键文献的研究地区主要集中于美国、澳大利亚、中国和欧洲部分国家(图3),仅有2项研究收集了不用国家的数据进行对比研究^[19-20],研究同时发现不同国家、不同文化背景的受访者对 AV 的反应有显著的差异。虽然有研究调查了同一国家不同地区的受访者数据,但缺少不同地区间的比较^[27,34],而已有研究表明即使是同一国家不同地区的民众也可能存在明显的偏好差异^[40],因此,未来还需加强研究结果在不同国家、地区、文化背景下的横向对比,以探究结果的有效性。同时,随着与自动驾驶相关的国家政策、法律法规、新闻报道的不断涌现,人们对于自动驾驶的认知将受到潜移默化的影响,还需要通过纵向研究、前后对比等手段研究这些外部因素在不同阶段对出行行为的影响。

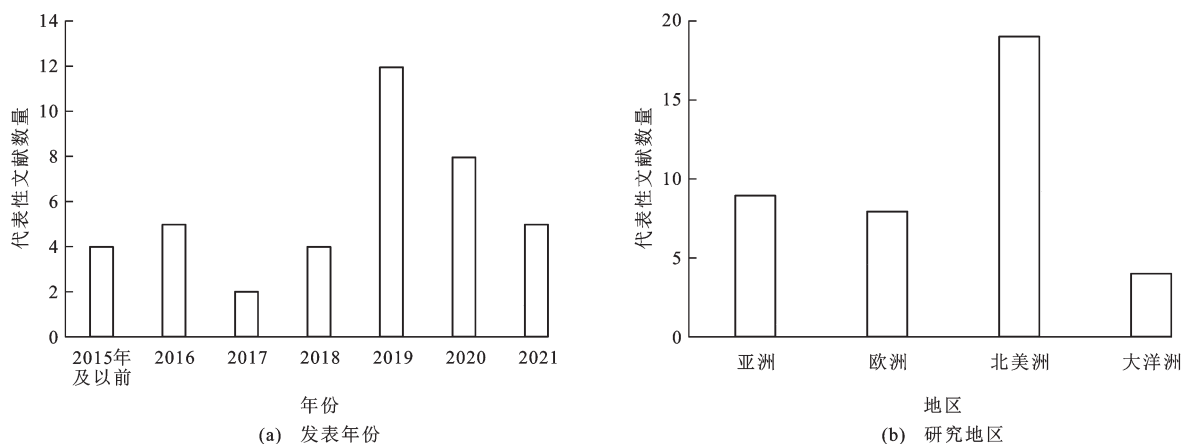


图3 代表性文献的发表时间和研究地区分布

Fig. 3 Distributions of publication time and study location of representative literatures

4.4 目前的分析方法多以假设分析、描述统计和离散选择模型为主,缺少精细化的分析,对异质性的考虑和处理也不足

考虑到自动驾驶正处于不断变化和发展的过程中,偏好异质性可能来源于受访者当前的出行模

态^[22]、所住地区^[40]、生活态度^[42]等方面。确定性的分组方法和随机性模型(例如潜在类建模)可以对总体样本进行分组,进而通过比较不同模型的结果能够检验异质性。在具体的研究方法中还可以采用能体现异质性的模型(例如随机参数 Logit、交叉嵌套

Logit 模型),并结合仿真分析与情景分析来检验边际效应的存在并探讨影响边际效应的因素。

4.5 对出行行为各方面研究内容的相互影响机理探索不足,研究内容还有待拓宽和丰富

本文回顾了与自动驾驶对出行行为影响相关的 3 个主要方面,但是这 3 个方面是有相互影响的,例如对出行方式选择的影响将直接影响到小汽车出行总需求,在途时间利用的方式也会影响出行方式的选择。而目前将不同的研究结果进行整合的研究较为缺乏,未来需要系统的探究各类出行行为间的相互影响机理,以提高对 AV 的影响估计的可靠性。对出行行为的研究内容可从以下 3 个方面进行补充完善。首先,在分析中考虑活动方式的变化(例如:视频会议、网上购物)、土地利用的改变、停车地点和停车方式的变化的影响。其次,目前在路径选择方面的研究相对缺乏。虽然有部分研究假设人们会遵循系统最优的方式来规划路径,但人们是否愿意以及在多大程度上接受这些设定仍然是需要研究的。最后,家庭选址和汽车保有等中长期出行行为的变化也有待进一步研究。

5 结 语

自动驾驶时代的来临将对人类出行行为产生相应的影响,本文对目前为止有关自动驾驶对出行行为影响的研究成果进行了总结归纳。

(1)在小汽车出行总需求估计方面,多数研究关注于当前出行服务不足人口的潜在出行需求,通过采用不同的假设分析发现未来 VMT 可能会增加 2%~60%。各类主观性较强的需求假设在很大程度上左右了 VMT 的增加量。

(2)自动驾驶应用背景下的出行方式选择研究大多关注自动驾驶技术对包含小汽车、公共交通、出租车、骑行等多种交通方式在日常出行中的方式选择行为的影响。当同时有私人普通汽车和私人自动驾驶汽车可选时,由于自动驾驶汽车还未真正问世,人们对自动驾驶持存疑和保守的态度,因此,更可能选择私人普通汽车^[19,24,36,41]。但对于有 SAV、自动驾驶出租车、需求响应型自动驾驶服务的选择,通过降低价格、增加舒适度的方法很可能吸引人们增加对其的需求^[24,28,41]。关于 AV 对公共交通的影响尚未得到一致的结论,但可将 AV 作为第一和最后一公里问题的解决方案^[24,37]。此外,自动驾驶汽车也可能减少人们使用主动交通的可能性^[29,33]。

(3)自动驾驶技术赋予了在途时间更多利用方

式的可能性,有可能改变人们出行的顺序和提高主观幸福感。但研究发现受访者目前尚未充分意识到自动驾驶技术这一优势,并且对自动驾驶的信任、车辆设计、运行状态、出行习惯等因素可能会影响将在途时间用于生产性活动的行为改变。

(4)未来,伴随着自动驾驶汽车的广泛示范应用及商业推广,需要采集具有良好 AV 试乘经历群体的数据来更精准地显示自动驾驶的影响。此外,还需补充研究样本代表性,在不同国家、不同地区、城市和乡村间开展横向研究,在不同自动驾驶技术的发展节点展开纵向研究,以加强分析结果的有效性和及时性。同时,加深研究方法的精细度,特别是增加对异质性的考虑,探讨自动驾驶时代各类出行行为间的相互影响机制也是未来研究的方向。

参 考 文 献 :

References :

- [1] LITMAN T. Autonomous vehicle implementation predictions: implications for transport planning[R]. Victoria: Victoria Transport Policy Institute, 2020.
- [2] CHAN Ching-yao. Advancements, prospects, and impacts of automated driving systems[J]. International Journal of Transportation Science and Technology, 2017, 6(3): 208-216.
- [3] HARPER C D, HENDRICKSON C T, MANGONES S, et al. Estimating potential increases in travel with autonomous vehicles for the non-driving, elderly and people with travel-restrictive medical conditions[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 72: 1-9.
- [4] DUARTE F, RATTI C. The impact of autonomous vehicles on cities: a review[J]. Journal of Urban Technology, 2018, 25(4): 3-18.
- [5] TAIEBAT M, BROWN A L, SAFFORD H R, et al. A review on energy, environmental, and sustainability implications of connected and automated vehicles[J]. Environmental Science and Technology, 2018, 52(20): 11449-11465.
- [6] KESZEY T. Behavioural intention to use autonomous vehicles: systematic review and empirical extension[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 119: 102732.
- [7] SPENCE J C, KIM Y B, LAMBOGLIA C G, et al. Potential impact of autonomous vehicles on movement behavior: a scoping review[J]. American Journal of Preventive Medicine, 2020, 58(6): 191-199.
- [8] DEB S, RAHMAN M M, STRAWDERMAN L J, et al. Pedestrians' receptivity toward fully automated vehicles: research review and roadmap for future research[J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2018, 48(3): 279-290.

- [9] 唐立,卿三东,徐志刚,等. 自动驾驶公众接受度研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(2): 131-146.
TANG Li, QING San-dong, XU Zhi-gang, et al. Research review on public acceptance of autonomous driving [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(2): 131-146. (in Chinese)
- [10] 秦波,陈筱璇,屈伸. 自动驾驶车辆对城市的影响与规划应对: 基于涟漪模型的文献综述[J]. 国际城市规划, 2019, 34(6): 108-114.
QIN Bo, CHEN Xiao-xuan, QU Shen. The impacts of autonomous vehicle on the cities and planning responses: a literature review based on ripple effect model [J]. Urban Planning International, 2019, 34(6): 108-114. (in Chinese)
- [11] BROWN A, GONDER J, REPAC B. An analysis of possible energy impacts of automated vehicles [C]//MEYER G, BEIKER S. Road Vehicle Automation. Berlin: Springer, 2014: 137-153.
- [12] SCHOETTLE B, SIVAK M. The reasons for the recent decline in young driver licensing in the United States[J]. Traffic Injury Prevention, 2014, 15(1): 6-9.
- [13] SIVAK M, SCHOETTLE B. Influence of current nondrivers on the amount of travel and trip patterns with self-driving vehicles[R]. Michigan: University of Michigan Transportation Research Institute, 2015.
- [14] WADUD Z, MACKENZIE D, LEIBY P. Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2016, 86: 1-18.
- [15] HARB M, XIAO Yu, CIRCELLA G, et al. Projecting travelers into a world of self-driving vehicles: estimating travel behavior implications via a naturalistic experiment[J]. Transportation, 2018, 45(6): 1671-1685.
- [16] PUDÁNE B, RATAJ M, MOLIN E J E, et al. How will automated vehicles shape users' daily activities? Insights from focus groups with commuters in the Netherlands [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2019, 71: 222-235.
- [17] SAEED T U, BURRIS M W, LABI S, et al. An empirical discourse on forecasting the use of autonomous vehicles using consumers' preferences[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2020, 158: 120130.
- [18] KIM S H, MOKHTARIAN P L, CIRCELLA G. How, and for whom, will activity patterns be modified by self-driving cars? expectations from the state of Georgia [J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2020, 70: 68-80.
- [19] HABOUCHE C J, ISHAQ R, SHIFTAN Y. User preferences regarding autonomous vehicles[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 78: 37-49.
- [20] ETZIONI S, HAMADNEH J, ELVARSSON A B, et al. Modeling cross-national differences in automated vehicle acceptance[J]. Sustainability, 2020, 12(22): 9765.
- [21] WICKI M, GUIDON S, BECKER F, et al. How technology commitment affects mode choice for a self-driving shuttle service [J]. Research in Transportation Business and Management, 2019, 32: 100458.
- [22] WINTER K, CATS O, MARTENS K, et al. Identifying user classes for shared and automated mobility services[J]. European Transport Research Review, 2020, 12(1): 36.
- [23] YAP M D, CORREIA G, VAN AREM B. Preferences of travellers for using automated vehicles as last mile public transport of multimodal train trips [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2016, 94: 1-16.
- [24] CAI Yu-tong, WANG Hong, ONG G P, et al. Investigating user perception on autonomous vehicle (AV) based mobility-on-demand (MOD) services in Singapore using the logit kernel approach[J]. Transportation, 2019, 46(6): 2063-2080.
- [25] GURUMURTHY K M, KOCKELMAN K M. Modeling Americans' autonomous vehicle preferences: a focus on dynamic ride-sharing, privacy and long-distance mode choices[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2020, 150: 119792.
- [26] KRUEGER R, RASHIDI T H, DIXIT V V. Autonomous driving and residential location preferences: evidence from a stated choice survey[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 108: 255-268.
- [27] ASHKROF P, DE ALMEIDA CORREIA G H, CATS O, et al. Impact of automated vehicles on travel mode preference for different trip purposes and distances [J]. Transportation Research Record, 2019, 2673(5): 607-616.
- [28] PAKUSCH C, MEURER J, TOLMIE P, et al. Traditional taxis vs automated taxis-does the driver matter for millennials? [J]. Travel Behaviour and Society, 2020, 21: 214-225.
- [29] BOOTH L, NORMAN R, PETTIGREW S. The potential implications of autonomous vehicles for active transport[J]. Journal of Transport and Health, 2019, 15: 100623.
- [30] CARRESE S, NIGRO M, PATELLA S M, et al. A preliminary study of the potential impact of autonomous vehicles on residential location in Rome[J]. Research in Transportation Economics, 2019, 75: 55-61.
- [31] ABE R, KITA Y, FUKUDA D. An experimental approach to understanding the impacts of monitoring methods on use intentions for autonomous vehicle services: survey evidence from Japan[J]. Sustainability, 2020, 12(6): 2157.
- [32] 黄浩. 基于扩展计划行为理论的自动驾驶汽车方式选择行为研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
HUANG Hao. Study on mode choice behavior of autonomous vehicle based on an extended theory of planned behavior[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019. (in Chinese)
- [33] PIATKOWSKI D P. Autonomous shuttles: what do users expect and how will they use them? [J]. Journal of Urban Technology, 2021, 28(3/4): 97-115.

- [34] KRUEGER R, RASHIDI T H, ROSE J M. Preferences for shared autonomous vehicles[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016, 69: 343-355.
- [35] WANG Shen-hao, ZHAO Jin-hua. Risk preference and adoption of autonomous vehicles[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2019, 126: 215-229.
- [36] GAO Jing-ya, RANJBARI A, MACKENZIE D. Would being driven by others affect the value of travel time? Ridehailing as an analogy for automated vehicles[J]. *Transportation*, 2019, 46(6): 2103-2116.
- [37] ABE R. Preferences of urban rail users for first- and last-mile autonomous vehicles: price and service elasticities of demand in a multimodal environment[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 126: 103105.
- [38] PAKUSCH C, STEVENS G, BODEN A, et al. Unintended effects of autonomous driving: a study on mobility preferences in the future[J]. *Sustainability*, 2018, 10(7): 2404.
- [39] KIM S H, CIRCELLA G, MOKHTARIAN P L. Identifying latent mode-use propensity segments in an all-AV era[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2019, 130: 192-207.
- [40] ZHOU Fan, ZHENG Zu-duo, WHITEHEAD J, et al. Preference heterogeneity in mode choice for car-sharing and shared automated vehicles[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2020, 132: 633-650.
- [41] ALHAJYASEEN W, ADNAN M, ABUHEJLEH A, et al. Travelers' preferences regarding autonomous mobility in the State of Qatar[J]. *Personal and Ubiquitous Computing*, 2021, 25(1): 141-149.
- [42] ETZIONI S, DAZIANO R A, BEN-ELIA E, et al. Preferences for shared automated vehicles: a hybrid latent class modeling approach[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 125: 103013.
- [43] SWEET M N. User interest in on-demand, shared, and driverless mobility: evidence from stated preference choice experiments in Southern Ontario[J]. *Travel Behaviour and Society*, 2021, 23: 120-133.
- [44] 姚荣涵, 梁亚林, 刘 锴, 等. 考虑合乘的共享自动驾驶汽车选择行为实证分析[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2020, 20(1): 228-233.
- YAO Rong-han, LIANG Ya-lin, LIU Kai, et al. Empirical analysis of choice behavior for shared autonomous vehicles with concern of ride-sharing[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2020, 20(1): 228-233. (in Chinese)
- [45] KESERU I, MACHARIS C. Travel-based multitasking: review of the empirical evidence[J]. *Transport Reviews*, 2018, 38(2): 162-183.
- [46] SUN S S, WONG Y D, RAU A. Economic assessment of a dynamic autonomous road transit system for Singapore[J]. *Research in Transportation Economics*, 2020, 83: 100843.
- [47] MILAKIS D, VAN AREM B, VAN WEE B. Policy and society related implications of automated driving: a review of literature and directions for future research[J]. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2017, 21(4): 324-348.
- [48] SIVAK M, SCHOETTLE B. Would self-driving vehicles increase occupant productivity[R]. Michigan: The University of Michigan, 2016.
- [49] BANSAL P, KOCKELMAN K M. Are we ready to embrace connected and self-driving vehicles? a case study of Texans[J]. *Transportation*, 2018, 45(2): 641-675.
- [50] CYGANSKI R, FRAEDRICH E, LENZ B. Travel-time valuation for automated driving: a use-case-driven study[C]// TRB. 94th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington DC: TRB, 2015: 15-4259.
- [51] PUDÁNE B, MOLIN E J E, ARENTZE T A, et al. A time-use model for the automated vehicle-era[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 93: 102-114.
- [52] SINGLETON P A. Discussing the “ positive utilities ” of autonomous vehicles: will travellers really use their time productively? [J]. *Transport Reviews*, 2019, 39(1): 50-65.
- [53] KASSENS-NOOR E, WILSON M, CAI M, et al. Autonomous vs. self-driving vehicles: the power of language to shape public perceptions[J]. *Journal of Urban Technology*, 2021, 28(3/4): 5-24.
- [54] BARBOUR N, MENON N, ZHANG Yu, et al. Shared automated vehicles: a statistical analysis of consumer use likelihoods and concerns[J]. *Transport Policy*, 2019, 80: 86-93.