

DOI 10.1007/s13762-014-0584-1

原版纸

# 街道环境对燃油效率的影响：从自然驾驶中得到的启示

X.Wang · C. Liu · L. Kostyniuk · Q. Shen · S. Bao

收到。2013年11月30日/修订：2014年3月4日/接受。2014年4月7日 / 在线发表：2014年5月15日  
©伊斯兰阿扎德大学 (IAU) 2014年

**摘要** 交通部门的燃料消耗和温室气体排放是"三足鼎立"的结果：燃料类型、车辆燃料效率和车辆行驶里程 (VMT)。虽然有大量的在研究建筑环境与总交通量之间关系的文献中，很少有研究关注街道环境对燃料消耗率的影响。我们的研究采用了结构方程模型来研究驾驶行为和燃油效率对不同街道环境的反应。我们使用了丰富的自然驾驶数据集，记录了从密歇根东南地区随机抽取的108名司机的详细驾驶模式。结果显示，紧凑型街道的一些特征，如较低的速度限制、较高的交叉口密度和较高的就业密度

与较低的驾驶速度、较多的速度变化和较低的燃料效率有关；然而，其他特征，如较高的人口密度和较高的行人规模的零售店的密度，可以提高燃料效率。我们研究的目的是为了进一步了解我们规划、设计和建造的城市地区和道路基础设施的能源和环境结果，并为有关可持续交通的政策决定提供更好的信息。

**关键词** 街道环境 - 燃油效率 - 燃油效率  
结构方程模型--自然式驾驶

## 简介

2012年，共有321.13亿公吨的二氧化碳被排放到地球大气中，其中36%来自石油的使用。同年，美国的二氧化碳排放量占世界的17.5%。交通部门是最大的二氧化碳产生者，在美国产生了超过30%的二氧化碳总量（其次是工业部门和住宅部门）（美国能源部2013年；美国环境保护局2013年）。汽车旅行对环境的影响是众所周知的，并在最近几年引起了极大的关注，因为世界上许多地方密集的汽车旅行加剧了石油消耗，增加了温室气体 (GHG) 的排放，导致全球变暖。

交通部门的燃料消耗和排放是"三足鼎立"的结果：燃料类型、车辆燃料效率和车辆行驶里程 (VMT)（尤因等人，2008）。虽然诸如替代燃料（Ras safi等人，2006年）和燃油效率的政策和战略

---

X.王 (✉)  
中密歇根大学地理系。  
287 Dow Science Building, Mount Pleasant, MI 48859, USA  
电子邮件: wang9x@cmich.edu

C.刘  
马里兰大学城市研究和规划项目，国家智能增长、研究和教育中心，学院公园，马里兰州20742，美国

L.Kostyniuk S. Bao  
密歇根大学交通研究所，2901 Baxter Rd., Ann Arbor, MI 48109-2150, USA

L.Kostyniuk  
美国密歇根大学城市与区域规划系，密歇根州安阿伯，美国

Q.申先生  
华盛顿大学建筑环境学院城市设计与规划系，西雅图。  
WA 98195-5740, USA

许多研究表明,土地利用和城市设计解决方案,如紧凑发展、智能增长和新城市主义(Duany等人, 2001年;新城市主义大会, 2013年),可以减少汽车出行,减少车辆行驶里程,并减少交通相关的燃料消耗和排放(Banister等人, 1997年;Newman和Kenworthy, 1989年;Frank等人, 2006年;Cervero和Kockelman, 1997年;Cervero和Murakami, 2010年)。根据美国交通部最近提交给国会的报告,在美国,土地利用战略每年可以减少28-

84万公吨的汽车二氧化碳当量,而且随着时间的推移,这种好处将增长到2050年的可观数量(美国交通部2010)。认识到紧凑的土地使用模式的好处,美国环境保护局(EPA)现在鼓励州和地方政府在州空气质量计划中考虑紧凑的土地使用策略的空气质量效益(EPA 2001)。

我们对建筑环境的能源和环境结果的理解并不完整。虽然有大量的文献研究了通过改变土地使用模式和道路设计来减少机动车流量和温室气体排放的潜力(Ewing和Cervero 2001; 2010),但很少有研究关注街道环境对燃料效率的影响(Liu和Shen 2011)。Ewing等人(2008年)在估计未来城市发展的CO<sub>2</sub>排放(燃料消耗的产物)的研究中提出,在估计这种发展的排放结果时,我们可能需要对紧凑型发展进行排放"惩罚",因为这种发展可能通过降低平均车速对排放率产生二次影响(Ewing等人, 2008年)。然而,是否应该对紧凑型发展进行惩罚以及惩罚的程度尚不清楚,部分原因是现有的研究很少对街道环境对燃油效率和排放率的影响进行实证研究。本文的主要目标是通过研究街道环境和燃料效率之间的关系来填补这一空白。我们的研究旨在为关于车辆出行量和车辆出行的燃油效率之间的权衡的讨论做出贡献。

对于一个特定的车辆类型/技术,燃油效率主要由驾驶方式决定,如平均速度、加速/减速、怠速和巡航,而这些又受到沿街建筑环境的影响。研究表明,低速驾驶、频繁的走走停停行为和过度的空转(即车辆在发动机运转但不移动时的状态)会降低车辆的燃油效率(Brundell-Freij和Ericsson 2005; Ericsson 2001)。以狭窄车道为特征的社区街道。

低速度限制、面向行人的零售店和充足的人行道为促进步行和公共交通的使用提供了有希望的设计方案,从而导致更少的汽车旅行和更少的车辆行驶里程(Duany等人, 2009; McCann和Rynne, 2010)。然而,紧凑型街道对燃料效率的影响并不明确。沿着紧凑街道行驶的司机可能会以低速行驶,在交通信号灯前频繁停车,在停车标志前等待,并为行人让行。这样的驾驶行为可能会导致每英里的车辆燃料消耗增加。相反,如果紧凑的街道能够促进交通顺畅,驾驶速度适中,干扰很小,在这样的街道上驾驶可能意味着更高的燃油效率。

为了实证检验街道环境与燃油效率之间的联系,研究人员需要克服两个主要挑战。(1)

量化街道环境,以及(2)

测量车辆驾驶的燃料效率。第一个挑战来自于街道环境的多面性,它不仅包括道路本身的特征,还包括路边的特征。道路的特征,如宽度、车道数、速度限制和交通信号等,影响着司机在道路上的行为方式,并随后影响他们驾驶的燃油效率。除了道路附近的建筑物外,商业、后退、车道、土地使用和其他沿路的特征也是整个街道环境的一部分,也会影响司机的行为。现有的研究集中在单个道路特征的影响上,如交叉口(Pandian等人, 2009年; Malakootian和Yaghmacian, 2004年)、环岛(Várhelyi, 2002年)和交通阻塞装置(Ahn和Rakha, 2009年)对驾驶行为、燃油效率和排放率的影响(Fitzpatrick等人, 2001年; Malakootian和Yaghmacian, 2002年)。2001年; Malakootian和Yaghmacian 2004年),而考察燃油效率和多维道路特征之间关系的研究则很少(Nesamani等人, 2011年)。

研究街道环境对燃油效率影响的第二个挑战是如何测量街道层面的燃油效率,以便将其与街道环境联系起来。燃油效率数据很难收集,而对每条街道上行驶的每个司机的燃油效率的测量就更难获得。自20世纪50年代以来,一些道路研究使用装有多个传感器的车辆来收集驾驶信息,并研究不同驾驶模式对燃料消耗和排放的影响。先进的技术,如便携式排放测量系统(PEMS)使逐秒收集排放数据成为可能(Coelho等人, 2009; Frey等人, 2010; Wang等人, 2013)。尽管仪器化车辆和PEMS为研究驾驶行为和燃料使用之间的联系提供了必要的工具,但使用仪器化车辆来研究燃料使用的影响是不可能的。

街道环境对燃料消耗的影响是具有挑战性的。在过去的研究中,一个司机样本通常在一天中的不同时间,在各种类型的道路上驾驶仪器车辆(Ericsson 2000; Kenworthy等人1992)。然而,驾驶模式和排放通常是针对广泛定义的道路类型测量的,如高速公路和主干道,对土地使用模式和其他路边特征不敏感,而这些特征可能会因特定类型的道路而有所不同。另一个限制是,监测到的样本司机的驾驶行为可能不反映他们的自然驾驶行为,因此,所收集的燃料使用数据可能有偏差。

在这项研究中,我们通过对几个方面测量街道环境来解决第一个挑战。我们测量了道路特征,如车道数、限速、交叉口数量,以及路边特征,如步行者规模的零售企业、人口密度和就业密度。为了估计街道层面的燃油效率,我们的研究使用了丰富的自然驾驶数据集,记录了密歇根州东南部随机选择的108名司机的详细驾驶行为。司机是在密歇根州州长办公室的协助下招募的,州长办公室是密歇根州的驾驶执照颁发机构。每位司机都得到了一辆装有仪器的车辆,为期40天,并被要求按照他/她使用自己的私人车辆的方式来使用它(因此,称为"自然驾驶")。该车配备了多个传感器,收集了燃料使用、车速、位置(经纬度)和时间等信息。利用这个数据集,我们得出了一个燃油效率的衡量标准,量化了每次车辆行驶过程中穿越的每个街道段的燃油效率。我们还得出了驾驶措施,如平均速度和速度变化,这将使我们能够测试驾驶行为对燃油效率的中间效应。然后,我们使用结构方程模型(SEM)来测试街道环境对燃油效率的直接和间接影响,通过控制行程特征、驾驶员属性和天气条件。该研究于2013年至2014年在密歇根州的Mount Pleasant进行,而本研究中使用的自然驾驶数据集是在2009年4月至2010年4月间收集的。

## 材料和方法

### 研究领域和研究数据

我们研究的区域包括密歇根州东南部地区的六个县(如图1所示)。该地区包括底特律市,它是美国最无序的地区之一(Galster等人, 2001)。该地区的大多数居民依靠汽车来满足他们的需求。

日常出行需求。根据2001年的全国家庭旅行调查,底特律大都会区90%的旅行是由私人车辆完成的(NHTS 2004)。虽然整体上是无序的,但该地区有几个就业次中心,其就业密度和就业可及性相对较高(Grengs 2010)。该地区提供了各种不同规模和功能的道路,并贯穿不同类型的环境,从低密度的住宅区、带状购物中心到紧凑和多样化的社区。

本研究中使用的自然驾驶数据是密歇根大学交通研究所(UMTRI)在2009年4月至2010年4月期间收集的基于车辆安全系统(IVBSS)综合项目数据的一部分。16辆装有IVBSS传感器的2006-07年本田雅阁LX轿车由108名志愿者司机驾驶,他们是从密歇根州东南部地区的持证司机中随机挑选和招募的。司机样本按年龄组(20-30岁,40-50岁和60-70岁)和性别平均分配。每个司机都被要求将车辆作为他/她自己的私人车辆使用,为期40天。IVBSS程序以10赫兹的频率收集信息,包括燃料使用、车速、位置(经纬度)、车头和时间。为了获得理想的分辨率并保持合理的工作负荷,我们使用了从原始数据集中提取的1赫兹的数据。由此产生的数据共记录了213,309英里,22,657次行程,相当于6,164小时的驾驶。

道路和建筑环境数据来自几个来源。2011年的道路信息来自密歇根州东南部政府委员会(SEMCOG),并按路段进行了整理。该道路数据集提供了诸如路段长度、道路功能分类、车道数和规定速度限制等信息。但该数据集只包含有资格获得联邦资金的道路信息。与当地政府维护的地方道路有关的信息没有包括在数据集中。由于数据的可用性,我们在研究中只考虑了联邦援助的道路。交叉口信息是从2010年美国人口普查的TIGER道路文件中提取的。商业机构数据是从私人供应商InfoUSA购买的,其中包含了2006年研究区域内76,000多家商业机构的位置、雇员人数和销售记录等信息。这些数据根据六位数的标准工业分类(SIC)代码对商业机构进行分类。我们还从美国2010年人口普查中获得了人口数据。

我们排除了所有州际公路和其他高速公路的路段,因为这些有限通道上的道路和路边的互动与其他类型的道路不同,而且道路环境的机制也不同。





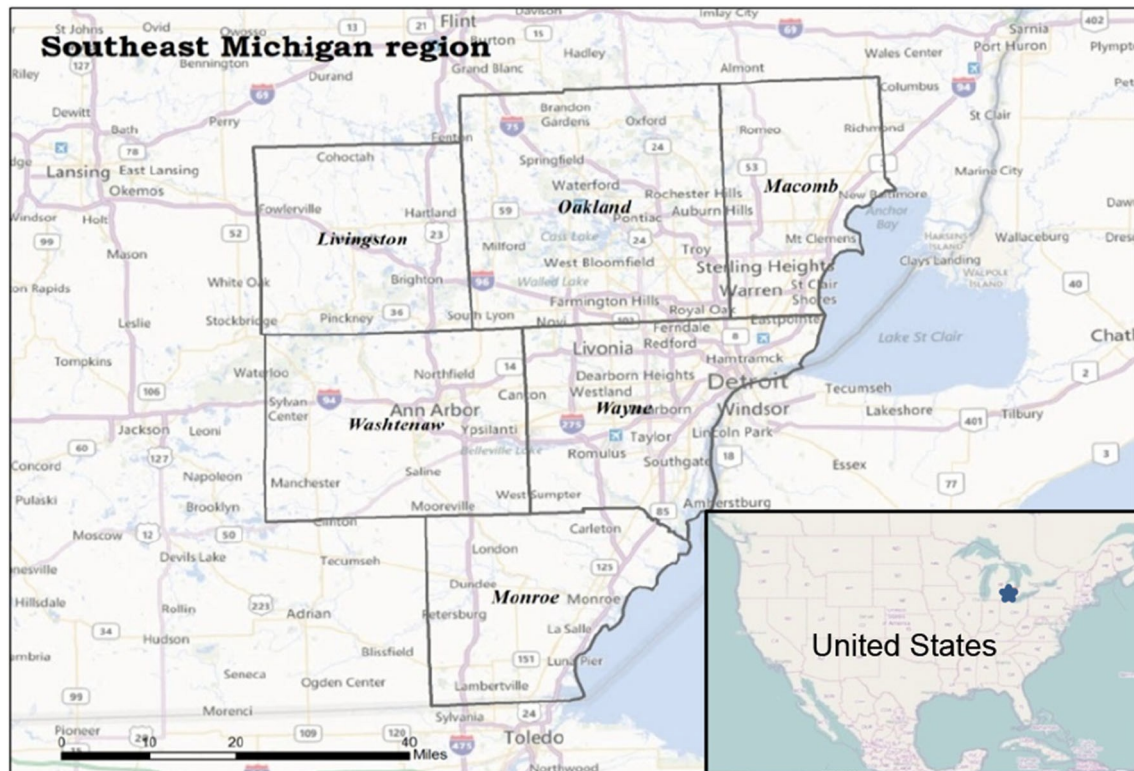


图1 研究区域。密歇根州东南部地区

影响燃油效率的因素可能是不同的。为了确保燃油效率估算的准确性，我们只选择了在研究期间至少有五名不同司机穿过的路段。

#### 结构方程模型法

影响燃油效率的因素主要有四类，包括建筑环境（包括道路和路边环境）、驾驶员特征、天气和车辆/燃料类型。图2总结了每一类中可能存在的变量。虽然诸如速度和速度变化等因素直接影响燃油效率，但包括街道环境在内的其他因素通过驾驶行为间接影响燃油效率。为了解析不同变量之间的关系，我们应用SEM技术来测量街道环境和燃油效率之间的直接和间接影响，同时测试驾驶行为对燃油效率的中间效应。

SEM由一个线性结构模型框架中的内生变量和外生变量组成，表示这些变量之间的多次回归（Hayduk 1988）。SEM中的外生变量和内生变量分别等同于常规回归模型中的独立变量和因果变量。不同的

与其他统计模型不同，SEM估计了内生变量之间以及内生变量和外生变量之间在一个同步方程系统中的相互关系。它可以用来确认这些变量之间的直接影响。SEM还允许将总效应分解为直接和间接效应。直接效应代表了外生变量和内生变量之间的直接联系，而间接效应则说明了外生变量通过至少一个额外变量的调解对内生变量的影响。虽然有许多先进的SEM模型，但我们目前的SEM结构采用了一种简单的方法来研究建筑环境和燃油效率之间最重要的关系。

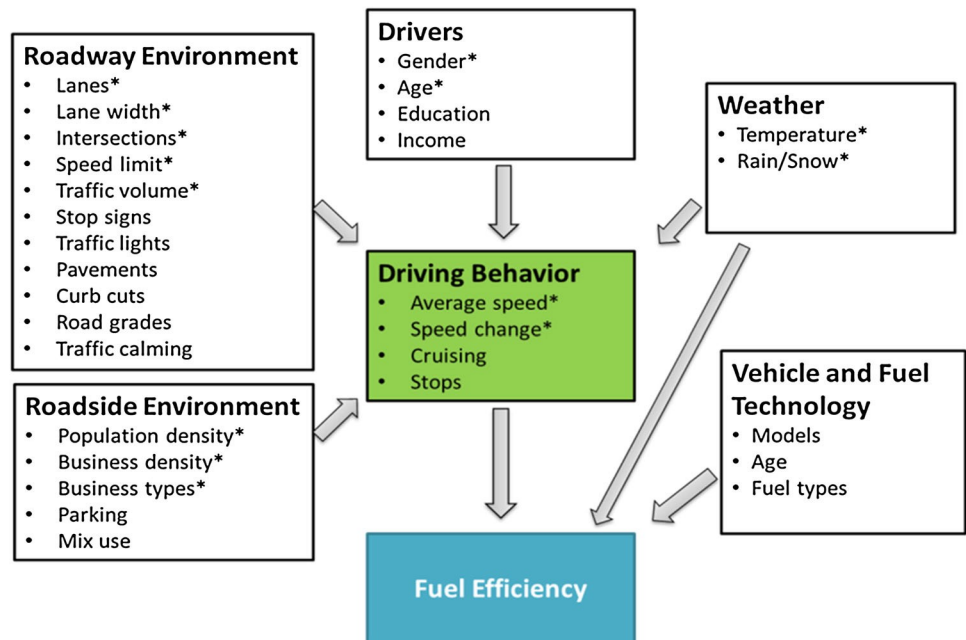
内生和外生变量以及干扰项的数学方程被定义为以下形式。

$$Y = \beta Y + \gamma X + \epsilon \quad (1)$$

其中， $Y$ 是内生变量的列向量（ $N_{YY}$ 是内生变量的数量，包括燃油效率和驾驶行为测量）， $X$ 是外生变量的列向量（ $N_{XX}$ 是外生变量的数量，包括街道环境测量、交通状况、驾驶员的人口统计学特征和驾驶行为）。

图2

研究框架：影响燃油效率的因素



气候条件）， $B\%$   $\delta N_Y$   $x$   $N_Y$   $p$  与内生变量有关的系数矩阵（代表内生变量对其他内生变量的直接影响）， $C\%$   $\delta N_{yx}$   $N_x$   $p$  与外生变量和内生变量有关的系数矩阵（代表外生变量对内生变量的直接影响）， $f\%$   $\delta N_{yx}$   $1p$  干扰项的列向量。

$B$ 和 $C$ 是结构矩阵，代表变量之间的关系。这些矩阵中的元素的模式是由假设大小的声明预先定义的。SE  $M$ 的估计采用最大

用方差-

协方差分析进行似然估计。让外生变量 $X$ 的方差-

协方差矩阵 $Var(X)=U$ ，干扰项 $f$ 的方差-

协方差矩阵 $Var\delta f\%$   $W$ 。

协方差矩阵 观测变量 $X$ 和 $Y$ 的 $\hat{R}$ 为

模型估计的目标是使估计的方差矩阵 $\hat{R}$ 与样本观测的方差矩阵 $S$ 之间的差异最小。

$$S - \hat{R} \approx \delta S - \hat{R}p$$

图2所示的一些变量比其他变量研究得更多：例如，交叉口（Pandian等人，2009年；Malakootian和Yaghmaian，2004年）、环岛（Várhelyi，2002年）和交通缓和装置（Ahn和Rakha，2009年）。尽管我们认为

图2中列出的变量是全面的，但它们并不详尽。关于其他可能影响燃油效率的道路和路侧特征的信息，如坡度、路面和混合用途的发展，在我们的数据中没有，也没有包括在当前的研究中。然而，应该补充的是，该地区相对平坦，没有大的垂直弯曲度或大的坡度，所有的路面都是铺设的。研究对象使用的仪器车辆几乎是相同的（2006-

07年本田雅阁LX轿车），因此排除了对不同车辆类型或替代燃料的分析。为了降低模型的复杂性，我们使用两个最重要的驾驶行为变量来描述驾驶行为：平均速度和速度变化。驾驶行为可以通过以下方式来表达

其他变量，如对突然停止的详细措施

和巡航，这可以被纳入未来的研究中。

我们的研究中包括的变量在图2中用星号突出显示。

自变量：燃油效率

燃油效率被定义为每单位VMT的比率消耗的燃料。IVBSS数据集提供了车辆

燃料使用和车辆位置的经纬度。这些行程在空间上被连接到一个路段网络。图3显示了两个司机的五个行程的逐秒IVBSS数据点，这些数据点被匹配到三个路段。然后，我们使用公式（2）来获得每一次车辆出行的每个路段的燃油效率。

根据公式(2)，我们计算了车辆行程( $j$ )所经过的每个路段( $i$ )的燃油效率，方法是该路段上每秒钟的行驶距离(在公式(2)中用 $d$ 表示) $_{ijm}$ 相加，除以车辆行程 $j$ 在同一路段上的总燃油消耗(用 $Rf$ 表示) $_{ijm}$ 。

$$d_{ijm}$$

$$E_{ij} = \frac{P}{f_{ijm}}$$

02p

其中 $E_{ij}$ 代表第 $j$ 次行程中第 $i$ 个路段的燃油效率； $f_{ijm}$ 代表第 $j$ 次行程中第 $i$ 个路段上第 $m$ 秒的燃油消耗； $d_{ijm}$ 代表第 $j$ 次行程中第 $i$ 个路段上第 $m$ 秒的行程距离。

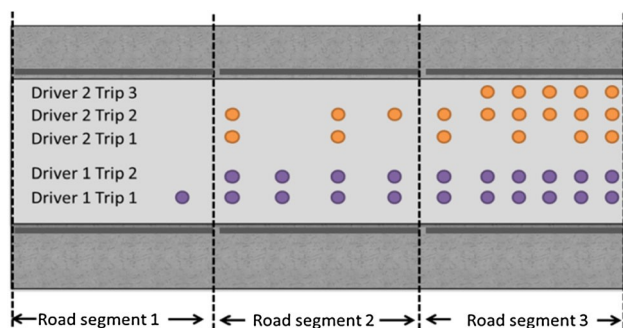


图3 IVBSS数据点的图示

我们的研究对象在18,371次旅行中行驶了8,978个路段，因此总共有125,054个燃油效率的观察值。在我们的样本中，每个路段平均由11名司机在71次旅行中走过。每个行程包含大约7个独特的路段。所有观测值的平均燃油效率为20.81英里/加仑，这与21英里/加仑的燃料经济性相近。

在我们的研究中使用的仪器车辆（2006年的本田雅阁，六缸，自动变速器），美国环保署发布的标准。传动）。

图4显示了密歇根州安阿伯市每个路段的平均燃油效率的空间分布情况。一般来说，与其他街道相比，安阿伯市中心的街道的燃油效率相对较低（红色和橙色突出显示）。

外生变量

街道环境变量

街道环境从几个方面进行了测量。根据过去的研究，我们在选择街道环境测量指标时试图平衡几个因素。包括道路功能、限速、车道数、交叉口密度和交通特征在内的道路特征被证明会影响驾驶行为和燃油经济性 (Ericsson 2000 ; Brundell-Freij和Ericsson 2005 ; Nesamani等人2011) ， 因此被列为

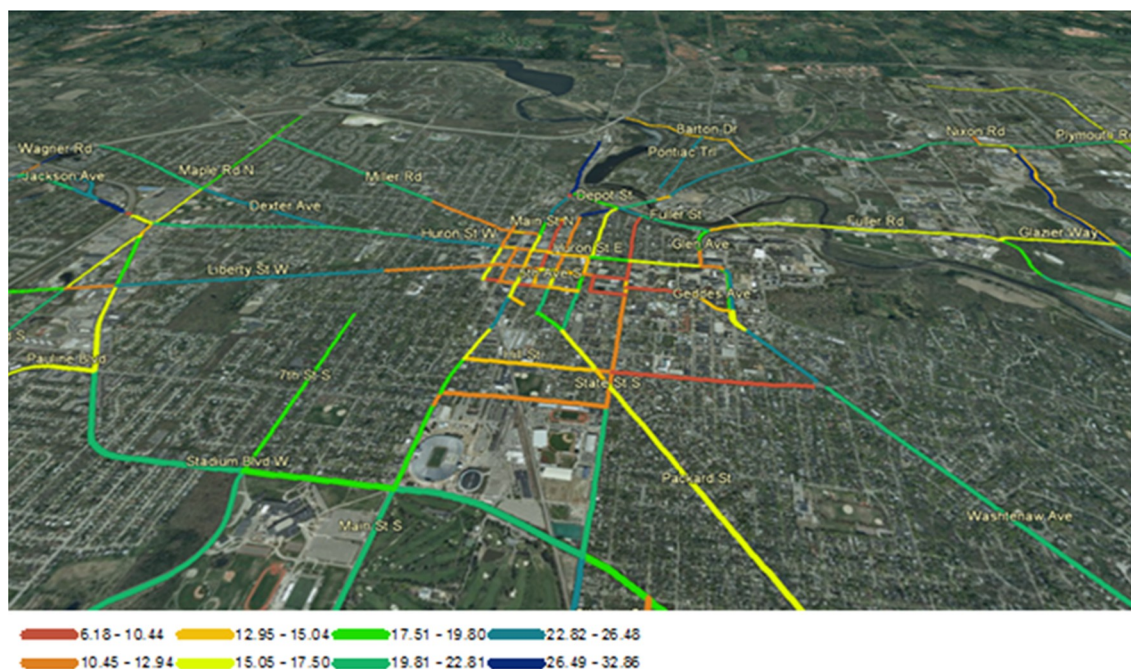


图4 燃油效率 (mpg) 的空间分布，安阿伯市，密歇根州



在目前的研究中,我们还包括了与VMT密切相关的街道特征。由于我们在本研究中的目标是为探索VMT和燃油效率之间的权衡做出贡献,我们还包括了与VMT有密切关系的街道特征;尽管这些特征在以前的燃油效率研究中可能没有被测试过。研究中包括了人口密度、就业密度和步行者规模的商店等路边特征,作为紧凑发展和以步行者为导向的设计的指标,这些指标被证明可以促进非机动车交通方式并减少车辆行驶里程。本研究中使用的路边街道环境变量是在一个路段的四分之一英里的缓冲区内测量的。我们测试了各种缓冲区的大小,道路段四分之一英里缓冲区内的街道环境产生了最佳拟合的SEM模型。每个街道环境变量的定义和总结如下。

**道路功能。**道路功能分类是基于公路性能监测系统(HPMS)的分类代码。我们数据库中的道路被划分为三种类型:主干道(NFC3)、次干道(NFC4)和主要集散地(NFC5)。所有的路段在模型中被分为两个虚拟变量(以主要集散地为参照组)。我们假设较低级别的道路,如主要集散路,与较低的燃油效率有关,因为驾驶速度较低,有更多的交通灯或停车标志的交叉口。

**公布的速度限制:**速度限制作为外生的街道环境变量之一被纳入其中。公布的速度与驾驶速度密切相关,尽管在现实中司机可能不会按照速度限制来驾驶。

**车道的数量。**车道的数量也是驾驶模式和燃油效率的一个决定因素。一般来说,多车道的道路意味着更高的速度,更少的急刹车,以及更高的燃油效率。然而,在某些时期,这些道路上的交通量接近或超过了容量,导致拥堵,这可能会降低燃油效率。

**交叉口密度。**交叉口密度的计算方法是将一个路段沿线的交叉口数量除以该路段的长度。较高的交叉口密度会导致更多的走走停停的驾驶,并可能降低燃油效率。

**交通数量。**交通繁忙的街道可能会降低燃油效率,因为司机可能会以低速行驶并进行更多的走走停停的活动。我们利用了IVBSS数据集中的交通计数信息。目标车辆前面的汽车数量是由车辆的正面雷达逐秒检测出来的。我们得出了交通计数

该变量是通过对目标车辆在一个路段上每秒钟行驶的车辆数量进行平均而得出的。应该注意的是,这个变量不是传统的交通量测量,它反映的是某段时间内经过某点的车辆总数。

**人口密度。**人口密度是通过将四分之一英里的缓冲区内的人口总数除以缓冲区面积来计算的。根据人口均匀分布和总人口与土地面积成比例的假设,将街区级人口普查数据与我们的道路缓冲区合并。我们对得出的人口密度进行了对数转换,以考虑到非正态性。密集街区的街道可能与更多的走走停停的交通和较低的燃料效率有关。

**就业密度。**每个区段的就业密度是通过将每个区段的企业雇员总数除以缓冲区来计算的。只有当企业位于该区段四分之一英里的缓冲区内时,才将点级企业数据加入该区段。我们还对就业密度进行了对数转换。我们假设有很多企业的街道可能会有较低的燃料效率,因为员工或企业客户引起的繁忙交通。

**行人规模的零售业。**行人规模的零售商业用地通常是在小面积的土地上,有路边停车位和小商店的后退,鼓励步行。这种类型的土地使用可能会降低燃油效率,因为司机可能需要注意行人,并可能不得不频繁停车。在本研究中,步行者规模的零售被定义为9,999平方英尺或以下的商业用途。由此产生的变量,行人规模零售业,衡量每段长度的行人规模零售业数量的对数。

### 控制变量

我们的研究包括三个控制变量:性别、年龄和天气。性别是一个虚拟变量,它将男性(1)和女性司机(0)区分开来。我们创建了三个虚拟变量来代表三个年龄组:年轻组(20-30岁),中年组(40-50岁),和老年组(60-70岁)。IVBSS数据集中没有提供详细的天气信息。我们使用温度和雨刷的使用情况作为天气状况的代用指标。温度变量衡量的是目标车辆外的平均温度。雨刷器使用量变量衡量在通过一个路段时雨刷器被使用的秒数。更高的



表1 外生和内生变量的描述性统计 (N = 125,054)。

变量	名称描述性统计				
	最低限度	最大平均值	AAA	AAA	差异
年轻人	0	1	0.38	0.48	0.24
中年	0	1	0.35	0.47	0.23
性别	0	1	0.55	0.49	0.24
温度 (OC)	-16.54	44.81	14.18	10.89	118.55
雨刮器的使用 (秒)	0	754	4.25	22.53	507.77
发布速度 (每英里 小时)	25	70	39.78	9.97	95.15
车道数	1	8	3.42	1.45	2.1
NFC3	0	1	0.54	0.49	0.25
NFC4	0	1	0.33	0.47	0.22
NFC5	0	1	0.13	0.33	0.11
流量统计	0	3	1.34	0.5	0.25
交叉点 密度 (每英 里的交叉口 )	0	150.9	3.93	6.18	38.14
就业密度 (每 亩地的雇员 数)。	-1.21	11.66	6.22	1.62	2.63
人口密度 (每 亩地的l n人)。	-1.25	9.59	6.81	1.38	1.92
行人规模的零 售业 (每段 的企业数量 )。	0.00	5.19	2.62	1.10	1.20
平均速度 (LN 米/秒)	-0.31	3.61	2.56	0.47	0.22
绝对速度变化 (ln米/秒)	-4.40	1.41	-0.83	0.71	0.51
燃油效率 (每 加仑英里数 )					
0.20139.6420.819.3887.98					

数字表明它更可能是不利的天气条件，如下雨或下雪。

中间变量

为了充分了解街道环境对燃油效率的影响是如何通过

我们构建了两个中间变量，平均速度和平均速度变化，以显示驾驶行为。

平均速度

在现有的文献中，速度已经被证明是一个燃油效率的最重要决定因素。这方面的关系速度和燃油效率之间的关系不是线性的。由于速度增加，燃油效率就会提高，直到达到最佳速度，然后，燃油效率开始下降 (Ericsson 2001)。最佳速度因车辆类型而异，但一般在50-55英里/小时之间 (EPA 2010)。由于我们的研究不包括州际公路和其他高速公路，我们的样本中包括的大部分驾驶 (占总驾驶的90%) 都低于最佳范围。我们探讨了我们的数据，并假设对数转换后的平均速度与燃油效率呈线性关系，平均速度的增加与燃油效率的增加有关。我们计算平均速度的方法是，在一次旅行中，对一个路段的所有数据记录，取其逐秒速度的平均值。

平均速度变化

速度变化是影响燃油效率的另一个重要因素。较高级别的速度变化 (如突然停车) 可能会大大降低燃油效率 (Ericsson 2001)。我们对每次行程中每个路段的所有驾驶的速度变化进行了逐秒平均。我们还对平均速度变化进行了对数转换。

所有变量的描述性统计见表1。

结果和讨论

我们的模型结果在表2 (直接效应) 和表3 (总效应) 中进行了总结。直接效应显示了 "效应" 变量 (如驾驶速度或燃油效率) 对 "原因" 变量 (如环境变量，如交叉口密度) 变化的最初反应 (Hayduk 1988)。间接效应是指一个变量通过一个或多个变量对另一个变量产生的影响。

内生变量。一个变量的总效应是直接效应和间接效应之和。虽然总效应是我们的重点，但直接效应 (在表2中总结，在图5中说明) 有助于了解重要变量影响驾驶行为和燃油效率的路径。我们测试了不同变量组合的性能，以减少多林的影响。



表2 直接效应的标准化系数

内生变量	平均速度 ( $R^2=0.22$ )	绝对速度变化 ( $R^2=0.37$ )	燃油效率 ( $R^2=0.61$ )
<i>外生变量</i>			
<i>社会-人口统计学</i>			
年轻人	0.028 (0.003)	0.025 (0.004)	
中年	0.017 (0.003)	-0.006 (0.004)	
性别	0.032 (0.003)	-0.026 (0.004)	
<i>与天气有关</i>			
温度			0.03 (0.002)
雨刮器的使用	0.00001 (0.00001)	-0.001 (0.0001)	
<i>路面上的街道环境</i>			
公布的速度（每小时英里）	0.015 (0.00001)	0.004 (0.000001)	
车道数	-0.018 (0.001)	0.032 (0.001)	
NFC3	0.154 (0.034)	-0.428 (0.047)	
NFC4	0.109 (0.034)	-0.413 (0.046)	
交通状况	0.121 (0.003)	-0.181 (0.004)	
交叉口密度	-0.009 (0.000001)	NS (NS)	
<i>路边街道环境</i>			
就业密度	-0.029 (0.001)	0.017 (0.001)	
人口密度	0.003 (0.000001)	-0.006 (0.001)	
行人规模的零售业	-0.001 (0.000001)	-0.002 (0.001)	
<i>驾驶行为</i>			
平均速度（米/秒）		-0.865 (0.004)	5.045 (0.047)
绝对速度变化（米/秒）			-7.908 (0.031)

除了用"NS"表示的系数外，所有的系数都在0.05的水平上有统计学意义。"NS"表示该变量没有统计学意义。模型拟合指数见附录1。括号内为标准误差。

耳朵的问题。模型拟合指数（如附录"1"所示）表明，我们的最终模型具有良好的模型拟合。我们还测试了模型的敏感性，将我们的样本随机分成两组，对每组进行SEM分析。我们对这些样本的模型结果与本文报告的结果没有明显不同。所有外生变量和内生变量之间的相关矩阵和VIF指数（衡量多重共线性严重程度的指标）列在附录"2"。

在所有变量中，速度和速度变化作为中间变量，对燃油效率的直接影响最强。平均速度对燃油效率的直接影响系数为5.045，而总影响系数为11.884。这表明，平均速度是燃油效率的一个强有力的预测因素，速度的增加会显著提高燃油效率。直接影响速度变化对燃油效率的影响是-7.908，这与总影响相同。较低的速度变化水平与较高的燃油效率有关。这个结果与Ericsson的研究（2001）的结果一致。该研究表明，侵略性驾驶（定义为突然的

和高加速和重断裂，即较高的速度震荡）被发现会导致更多的车辆动力需求和比平静驾驶更低的燃油效率。两个中间变量（平均速度和速度变化）之间的交互作用对直接效应和总效应都有预期的标志（两个系数都是-0.865在模型中）。该结果表明，当以相对较高的速度，驾驶行为通常是稳定的，速度变化减少。

街道环境对驾驶行为和燃油效率的影响

我们的研究结果表明，道路和路边街道环境变量对驾驶速度和速度变化都有显著的直接和总体影响。道路功能类型的系数对于平均速度来说是正的，而对于速度变化来说是负的，无论是直接影响还是总影响。结果显示，主要城市（参考组）的驾驶速度最低，速度变化最大。道路类型虚拟变量对燃油效率的总影响都是正的，表明

表3 总效应标准化系数

内生变量 0.61)	平均速度 ( $R^2=0.22$ )	绝对速度变化 ( $R^2=$	0.37) 燃油效率 ( $R^2=$
<b>外生变量</b>			
<i>社会人口统计学</i>			
年轻人	0.028 (0.003)	0.003 (0.005)	0.157 (0.051)
中年	0.017 (0.003)	-0.021 (0.005)	0.253 (0.052)
性别	0.034 (0.002)	-0.054 (0.004)	0.586 (0.041)
<i>与天气有关</i>			
温度			0.037 (0.002)
雨刮器的使用	0.00001 (0.0000001)	-0.001 (0.00001)	
<i>路面上的街道环境</i>			
公布的速度 (每小时英里)	0.015 (0.00000001)	-0.009 (0.000001)	0.144 (0.002)
车道数	-0.016 (0.001)	0.047 (0.002)	-0.445 (0.016)
NFC3	0.154 (0.004)	-0.197 (0.007)	2.331 (0.547)
NFC4	0.109 (0.004)	-0.139 (0.006)	1.65 (0.546)
流量统计	0.121 (0.003)	-0.285 (0.004)	NS (NS)
交叉口密度	-0.009 (0.000001)	0.007 (0.000001)	-0.099 (0.003)
<i>路边街道环境</i>			
就业密度	-0.029 (0.001)	0.042 (0.001)	-0.481 (0.01)
人口密度	0.003 (0.000001)	-0.009 (0.001)	0.084 (0.006)
行人规模的零售业	-0.001 (0.00000001)	NS (NS)	0.004 (0.007)
<i>驾驶行为</i>			
平均速度 (米/秒)		-0.865 (0.004)	11.884 (0.05)
绝对速度变化 (米/秒)			-7.908 (0.031)

除了用"NS"表示的系数外, 所有的系数都在0.05的水平上有统计学意义。"NS"表示该变量没有统计学意义。模型拟合指数见附录"1"。标准误差包含在括号内

由于低速行驶和高速变化, 主要收集器的燃油效率也最低。

较高的交叉口密度与较低的驾驶速度和较高的速度变化有关, 尽管总效应系数相当小 (分别为-0.009和0.007)。交叉口密度对燃油效率的总影响是-0.099, 表明交叉口密度的增加会导致燃油效率的降低。

发布的速度限制对平均驾驶速度有正的直接影响 (系数为0.015), 这是直观的。公布的限速对速度变化的影响很有意思: 虽然公布的限速对速度变化有正的直接影响 (0.004), 但间接影响是负的。公布的速度对速度变化的间接影响主要是通过驾驶速度来实现的。更高的速度限制增加了驾驶速度, 这与更稳定的驾驶模式有关 (更少的速度变化)。驾驶速度对速度变化的中介效应强于张贴速度限制对速度变化的直接效应, 这使得对速度变化的综合效应为负 (-0.009)。对速度变化的积极影响驾驶速度和对速度变化的负面影响都是

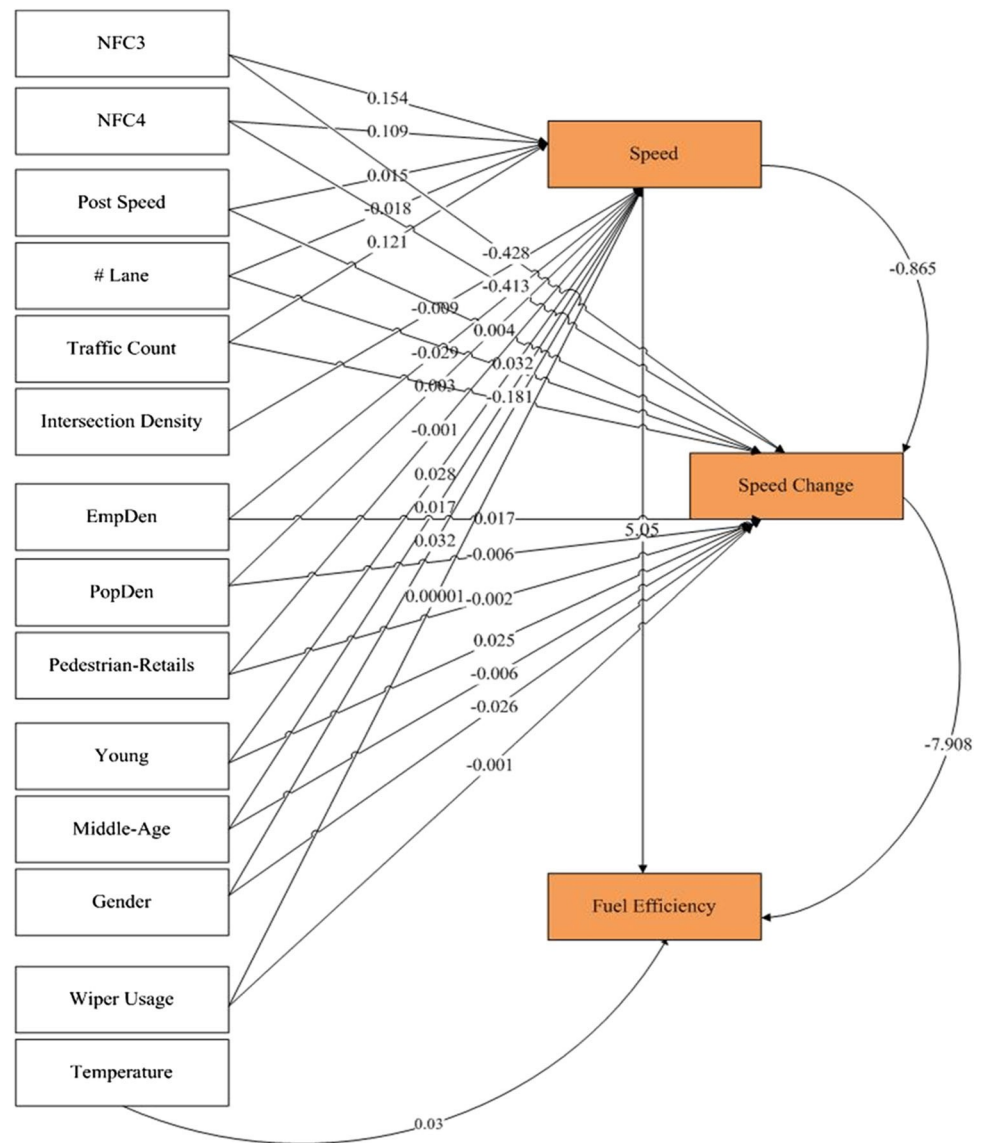
导致更高的燃料效率, 产生总的积极影响 (0.144)。

路边街道环境变量都对驾驶行为和燃油效率有明显影响。较高的就业密度与较低的驾驶速度、较高的速度变化, 以及随后较低的燃油效率有关。就业密度对驾驶速度、速度变化和燃油效率的总影响是-0.029, 0.042和-0.042。

0.481, 分别。在公路上行驶的司机, 在高商业/就业集中区可能会遇到交通信号、停车标志, 也可能会遇到拥堵, 所以在这些地区开车需要降低车速和更多的速度变化 (即减速、加速、停车和启动)。

与就业密度相比, 人口密度对驾驶行为和燃油效率有完全不同的影响。在控制了其他路边变量, 特别是就业密度的影响后, 较高的人口密度会导致较高的驾驶速度, 较低的速度变化, 以及较高的燃油效率。人口密度对驾驶速度、速度变化和燃油效率的总影响。燃油效率分别为0.003、-0.009和0.084。与繁忙的商业街不同, 居民人数较多的街道可能有较不复杂的交通流

图5 直接影响



这允许更快但更稳定的驾驶，从而导致更高的燃油效率。

步行街规模的零售业对速度的总影响是负的（-0.001），这与就业密度的影响一致，表明更多的步行街规模的零售业可能会降低驾驶速度，可能是由于更窄的车道，更多的交通信号，或其他交通缓和措施。与就业密度不同的是，步行者规模的零售业对速度变化的直接影响是负面的，这意味着司机在这种街道上行驶时的速度变化较低。具有更多步行规模的零售商业用途的街道可能会吸引更多的行人。由于预见到并注意到行人，司机可能会更加谨慎地驾驶，从而减少突然加速和急刹车。

降低速度的变化进一步提高了燃油效率，使行人规模的零售业对燃油效率的系数为正（0.004）。

较多的车道数显示对速度有负的直接影响（-0.018），对速度变化有正的直接影响（0.032）。一般来说，有多条车道的道路意味着更高的驾驶速度和更少的急刹车。

然而，我们的结果显示了相反的情况：多车道的道路与低速驾驶和更多的速度变化有关。我们的结果可能反映了多车道道路上的拥堵状况。当交通量超过道路容量时，产生的拥堵可能会降低驾驶速度，诱发更多的走走停停的驾驶行为，从而降低燃油效率。车道数对燃油效率的总影响是负的（-0.445）。



交通量对速度变化有负的直接影响（-0.181），对速度有正的直接影响（0.121）。这表明，在有交通流量的情况下，驾驶者会保持相对较高的驾驶速度，同时减少驾驶变化。

大量的交通，这是违反直觉的。对这一结果的一个解释可能是，我们的交通计数变量并不测量交通量，而是当地交通密度的一个代表。本研究使用的交通计数数据是从目标车辆的前部雷达上收集的，该雷达只能检测到前面的车辆数量。前面有更多的车辆并不一定意味着交通拥挤等严重的情况。它只是表明有七辆汽车围绕看目标车辆，而目标车辆正随着车流移动。在未来的研究中，可以开发出基于这一变量的不同交通测量方法。

#### 控制变量对燃油效率的影响

社会人口学和环境控制变量也是决定驾驶速度、速度变化和燃油效率的重要因素。相对于老司机，年轻和中年司机对平均速度都有正的总影响，这意味着他们比老司机开得快。正如前面所讨论的，较高的速度通常会提高燃油效率。由于较高的驾驶速度，年轻和中年司机的燃油效率较高（他们的总效应分别为0.157，和0.253）。与中年司机相比，年轻司机的燃油效率较低，因为他们的加速更积极，停车更频繁：年轻司机对速度变化的总影响要比中年高得多。性别对燃油效率也有明显的、积极的直接和总影响。结果显示，女性司机的燃油效率低于男性司机，这是由于较低的驾驶速度和较多的速度变化造成的。

在环境控制变量中，雨刷器的使用被用来表示当天的天气状况。无论是雨天还是雪天，都会导致更高的速度和更少的速度变化，这可能是由于在天气下更谨慎但匆忙的驾驶行为。外部温度与燃油效率有正相关关系。当控制其他因素时，当外部温度降低时，燃油经济性会下降。

#### 总结

我们的研究使用SEM来研究驾驶行为和燃油效率如何应对不同的街道环境。我们利用丰富的自然驾驶数据集，记录了密歇根州东南部地区108名经过严格挑选的司机的详细驾驶模式。结果表明，在公路和路边

街道环境变量对燃油效率的总影响具有统计学意义。街道环境变量的显著间接效应表明，街道环境对燃油效率的影响是通过驾驶速度和速度变化来实现的。驾驶行为变量，速度和速度变化，被发现与燃油效率密切相关：更高的速度和更低的速度变化导致更好的燃油效率。降低驾驶速度和增加速度变化的街道环境特征很可能会降低燃油效率。结果显示，功能分类较低、限速较低、交叉口密度较高和就业密度较高的道路与较低的驾驶速度、较多的速度变化和较低的燃油效率有关。我们的结果表明，在估计城市发展的燃料消耗和排放时，有理由对具有上述特征的街道进行"惩罚"。虽然紧凑的街道通常鼓励更短的行程和更多的非机动车模式，但它们也可能导致更高的单位驾驶距离的燃料消耗。

此外，我们发现紧凑型街道的一些特征可能会被豁免于"惩罚"。例如，以行人为导向的零售商业用途的较高密度可能与较低的速度变化水平有关，从而提高燃油效率。在控制了其他路边变量的影响后，人口密度较高的街道同样与较好的燃料效率有关。可能还有其他可以提高燃油效率的街道特征，而这些特征在我们的研究中没有体现。尽管如此，我们的研究说明了如何找到这些特征以及如何衡量它们的影响。

由于燃油效率主要由速度和速度变化等驾驶行为决定，政策制定者和交通规划者需要把重点放在改变建筑环境上，不提倡极端低速驾驶和突然改变速度。例如，紧凑地区的环岛可能会提高燃油效率，因为它促进了合理速度下的持续交通流。步行街是为行人设计的商业街，禁止车辆通行，可以提高燃油效率，因为行人和车辆之间的分离可以减少行人和车辆的冲突，确保所有道路使用者的顺利出行。识别能够减少紧凑街道的燃油效率"惩罚"的策略可能是一个潜在的研究课题。

我们的研究结果表明，虽然利用自然驾驶数据集进行进一步研究有明显的潜力，但在对街道环境、驾驶模式和燃油效率之间的关系进行建模时，也有一些数据和方法上的挑战需要解决。我们



使用平均速度和速度变化来描述驾驶行为的特点。尽管这两个变量是影响燃油效率的最重要的变量，但驾驶行为还可以通过其他变量来描述，如对急停和巡航的详细测量。未来的研究可以纳入一套更全面的驾驶行为措施。此外，开发并纳入更多的道路和路边街道环境变量，如道路坡度、路面状况、交通缓和装置、交通灯、停车标志和交通量，将是有益的。使用因子分析和聚类分析对街道环境进行分类，可以深入了解不同的环境特征是如何混合和组合的，以及这种混合如何影响燃油效率。在分析中包括与活动相关的详细行程信息也可能是有意义的。例如，旅行的目的、一天中的时间、旅行起点和目的地可能会影响人们在哪里开车以及他们在开车时的行为方式。未来的研究方向还应该考虑燃油效率高的车辆的变化。随着这些车辆（如插电式混合动力电动车）的普及，必须进行类似的分析，研究车辆技术、土地使用和燃料效率之间的相互联系。

目前的研究采用了一种简明的SEM模型技术。用更先进的建模技术来分析这些数据可能也是有用的。最近

先进统计方法的发展在各个方面提高了SEM的建模能力。例如，多层次结构方程模型（ML-SEM）允许SEM和多层次模型（MLM）的完全整合（Kline 2011）。这种建模技术的应用将使我们能够对嵌套在不同地理区域的建筑环境进行建模，并更好地捕捉建筑形式在旅行行为分析中的作用。最近"大数据"的数据挖掘技术的发展为研究人员提供了前所未有的机会，从大量的数据中提取重要的模式和趋势（Hastie 等人，2009）。自然驾驶数据与道路和路边信息一起当然可以被视为"大数据"。因此，数据挖掘可以为进一步探索自然驾驶数据中的道路、路边、驾驶和燃油效率之间的关系提供一种创新的方法。

作者希望感谢密歇根大学交通研究所的支持，该研究所提供了自然驾驶数据集和密歇根东南大学的支持。政府委员会提供了本研究中使用的道路网络数据。

附录1

见表4。

表4 模型拟合指数

模型拟合指数	公式	描述	建议的截止值	模型值
$\chi^2 (df)$	$(N - 1)F_{min}$	衡量观察到的和模型推测的协方差矩阵。 $\chi^2$ 取决于样本大小。数值越小说明模型的拟合度越高。	$P \geq 0.05$	$\chi^2 = 372.197$ $df = 13$ $p = 0.000$
RMSEA (根近似值的均方误差)	$RMSEA = \sqrt{\frac{\chi^2}{n}}$	衡量每个模型自由度的近似误差量，同时控制样本量。较小的数值表明模型拟合度较高。	$\leq 0.05$	0.015
SRMR (标准化的均方根残差)	$SRMR = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{i=1}^p e_i^2}$ 其中， $e_i = \frac{y_i - \hat{y}_i}{\sigma_{y_i}}$ 1)/2是模型中p个变量中唯一的变异/协方差。	衡量观察到的和模型推测的协方差之间的总体差异	$\leq 0.05$	0.003
CFI (比较拟合指数)	$CFI = 1 - \frac{\max(\chi^2_{模型}, df_{模型}; 0)}{\max(\chi^2_{模型}, df_{模型}; 0)}$	评估改善的情况。假设的模型M与不相关变量的基础模型相比较	$\geq 0.9$	0.99
TFL (Tucker-Lewis)	$TFL = \frac{\chi^2}{n} - \frac{1}{2n} \ln \frac{\chi^2}{n}$			
ker-刘易斯指数)	$\frac{\chi^2}{n} - \frac{1}{2n} \ln \frac{\chi^2}{n}$			



表5 相关系数和VIF

	年轻人	中年人	性别	温度	刮水器	发布速度	N_Lanes	NFC3	NFC4	流量统计	交叉口书房	赋能	邓小平	小卖部	速度	速度变化	VIF
年轻人	1	-0.559**	0.016**	-0.033**	-0.072**	-0.065**	0.004	0.032**	-0.044**	-0.039**	0.046**	0.047**	0.057**	0.038**	-0.017**	0.032**	1.48
中年	-0.559**	1	-0.004	0.010**	0.219**	0.077**	-0.027**	-0.022**	0.019**	0.023**	0.009**	-0.056**	-0.095**	-0.036**	0.034**	-0.033**	1.54
性别	0.016**	-0.004	1	0.023**	0.008**	0.092**	-0.093**	-0.073**	0.062**	-0.045**	0.010**	-0.112**	-0.124**	-0.103**	0.074**	-0.056**	1.03
温度	-0.033**	0.010**	0.023**	1	-0.037**	0.041**	-0.023**	-0.028**	0.027**	-0.025**	-0.018**	-0.022**	-0.009**	-0.022**	0.033**	-0.048**	1.06
刮水器	-0.072**	0.219**	0.008**	-0.037**	1	0.001	-0.016**	-0.029**	0.026**	0.038**	0.015**	0.006*	-0.014**	0.021**	-0.053**	0.063**	1.05
发布速度	-0.065**	0.077**	0.092**	0.041**	0.001	1	-0.013**	0.059**	0.060**	0.108**	-0.109**	-0.256**	-0.178**	-0.243**	0.399**	-0.201**	1.31
N_Lanes	0.004	-0.027**	-0.093**	-0.023**	-0.016**	-0.013**	1	0.442**	-0.249**	0.251**	0.006*	0.293**	0.105**	0.302**	-0.033**	0.055**	1.38
NFC3	0.032**	-0.022**	-0.073**	-0.028**	-0.029**	0.059**	0.442**	1	-0.765**	0.344**	0.034**	0.217**	0.048**	0.230**	0.074**	-0.062**	3.1
NFC4	-0.044**	0.019**	0.062**	0.027**	0.026**	0.060**	-0.249**	-0.765**	1	-0.226**	-0.031**	-0.138**	-0.040**	-0.148**	0.016**	0.002	2.57
交通统计	-0.039**	0.023**	-0.045**	-0.025**	0.038**	0.108**	0.251**	0.344**	-0.226**	1	-0.004	0.149**	0.048**	0.145**	0.151**	-0.192**	1.23
交叉口书房	0.046**	0.009**	0.010**	-0.018**	0.015**	-0.109**	0.006*	0.034**	-0.031**	-0.004	1	0.071**	0.109**	0.102**	-0.154**	0.080**	1.05
赋能	0.047**	-0.056**	-0.112**	-0.022**	0.006*	-0.256**	0.293**	0.217**	-0.138**	0.149**	0.071**	1	0.365**	0.663**	-0.242**	0.171**	1.99
邓小平	0.057**	-0.095**	-0.124**	-0.009**	-0.014**	-0.178**	0.105**	0.048**	-0.040**	0.048**	0.109**	0.365**	1	0.330**	-0.113**	0.045**	1.21
小卖部	0.038**	-0.036**	-0.103**	-0.022**	0.021**	-0.243**	0.302**	0.230**	-0.148**	0.145**	0.102**	0.663**	0.330**	1	-0.184**	0.113**	1.9
速度	-0.017**	0.034**	0.074**	0.033**	-0.053**	0.399**	-0.033**	0.074**	0.016**	0.151**	-0.154**	-0.242**	-0.113**	-0.184**	1	-0.588**	1.81
速度变化	0.032**	-0.033**	-0.056**	-0.048**	0.063**	-0.201**	0.055**	-0.062**	0.002	-0.192**	0.080**	0.171**	0.045**	0.113**	-0.588**	1	1.58

\*\* 相关性在0.01水平上是显著的（2尾）。

\* 相关性在0.05水平上是显著的（2尾）。



## 参考文献

- Ahn K, Rakha H (2009) 对交通疏导的环境和能源影响的实地评估案例研究。 *Transp Res Part D Transp Environ* 14(6):411-424. doi:10.1016/j.trd.2009.01.007
- Banister D, Watson S, Wood C (1997) Sustainable cities: transport, energy, and urban form. *Environ Plan B Plan Des* 24(1):125-143
- Brundell-Freij K, Ericsson E (2005) 街道特征、司机类别和汽车性能对城市驾驶模式的影响。 *Transp Res Part D* 10(3):213-229
- Cervero R, Kockelman KM (1997) Travel demand and the 3Ds: density, diversity, and design. *Transp Res D* 2(3):199-219
- Cervero R, Murakami J (2010) 建筑环境对车辆行驶里程的影响：来自370个美国城市化地区的证据。 *Environ Plan A* 42:400-418
- Coelho MC, Frey HC, Rouphail NM, Zhai H, Pelkmans L (2009) 评估基于微观测量的汽油和柴油轻型车辆排放的方法。 *Transp Res Part D Transp Environ* 14(2):91-99. doi:10.1016/j.trd.2008.11.005
- 新城市主义大会 (2013) 《新城市主义宪章》，第二版。McGraw-Hill Professional
- Duany A, Plater-Zyberk E, Speck J (2001) *Suburban nation: the rise of sprawl and the decline of the American dream*. 北点出版社, 纽约
- Duany A, Speck J, Lydon M (2009) *The smart growth manual*. 麦格劳-希尔公司, 纽约
- EPA (2001) EPA指导：通过土地使用活动改善空气质量。运输和空气质量办公室运输和区域项目部，华盛顿
- EPA (2010) 2010年燃油经济性指南。美国能源部。美国环境保护局 (U.S. Environmental Protection Agency)
- Ericsson E (2000) 城市驾驶模式的可变性。 *Transp Res Part D* 5:337-354
- Ericsson E (2001) 独立驾驶模式因素及其对燃料使用和废气排放因素的影响。 *Transp Res Part D* 6(5): 324-345
- Ewing R, Cervero R (2001) Travel and the built environment: a synthesis. *Transp Res Rec* 1780(1):87-114
- Ewing R, Cervero R (2010) Travel and the built environment. *J Am Plan Assoc* 76 (3) : 265-294
- Ewing R, Bartholomew K, Winkelman S, Walters J, Chen D (2008) Growing cooler: evidence on urban development and climate change. ULI, 华盛顿特区
- Fitzpatrick K, Carlson P, Brewer M, Wooldridge M (2001) 影响郊区街道上司机速度的设计因素。运输研究记录1751 (论文编号：01-2163)。
- Frank LD, James FS, Terry LC, James EC et al (2006) Many pathways from land use to health. *Am Plan Assoc J Am Plan Assoc* 72(1):75
- Frey HC, Zhang K, Rouphail NM (2010) 基于道路测量的特定车辆排放模型。Doi:10.1021/es902835h.
- Galster G, Hanson R, Ratcliffe MR, Wolman H, Coleman S, Freinage J (2001) Wrestling sprawl to the ground: defining and measuring an elusive concept. *住房政策辩论* 12 (4) : 681-717
- Greengs J (2010) Job accessibility and the modal mismatch in Detroit. *J Transp Geogr* 18(1):42-54. doi:10.1016/j.jtrangeo.2009.01.012
- Hastie T, Tibshirani R, Friedman J, Hastie T, Friedman J, Tibshirani R (2009) *The elements of statistical learning*, vol 1, 2. 斯普林格, 海德堡
- Hayduk LA (1988) *Structural equation modeling with LISREL: essentials and advances*. JHU出版社
- Kenworthy JR, Newman PWG, Lyons TJ (1992) The ecology of urban driving I-methodology. *Transp Res Part A Policy Pract* 26(3):263-272. doi:10.1016/0965-8564 (92) 90036-7
- Kline RB (2011) *Principles and Practice of structural equation modelling*. Guilford press, New York
- Liu C, Shen Q (2011) 城市形态对家庭出行、能源消耗和排放影响的实证分析。 *Comput Environ Urban Syst* 35(5):347-357
- Malakootian M, Yaghmaeian K (2004) 调查市辖区重交通路口的一氧化碳。 *Int J Environ Sci Technol* 1 (3) : 227-231
- McCann B, Rynne S (2010) *Complete streets: best policy and implementation practices*. 美国规划协会 (Planners Press)。
- Nesamani JS, Saphores J-D, McNally MG, Jayakrishnan R (2011) The Influence of emission specific characteristics on vehicle operation: a micro-simulation analysis. 加州大学欧文分校运输研究院
- Newman PWG, Kenworthy JR (1989) Gasoline consumption and cities. *Am Plan Assoc J Am Plan Assoc* 55 (1) : 24
- NHTS (2004) 2001年全国家庭旅行调查用户指南 (第三版)。美国交通部联邦公路管理局, 华盛顿
- Pandian S, Gokhale S, Ghoshal AK (2009) 评估交通和车辆特征对交通交叉口附近车辆排放的影响。 *Transp Res Part D Transp Environ* 14(3):180-196. doi:10.1016/j.trd.2008.12.001
- Rassafi A, Vaziri M, Azadani A (2006) 伊朗客车利用替代燃料的战略。 *Int J Environ Sci Technol* 3 (1) : 59-68
- 美国能源部 (2013) 《2013年国际能源展望》提前发布。华盛顿特区
- 美国交通部 (2010年) 向国会提交的交通在减少美国温室气体排放中的作用报告, 第一卷。美国交通部, 华盛顿特区
- 美国环境保护局 (2013年) 美国温室气体排放和汇的清单, 1990-2011。



- Várhelyi A (2002) The effects of small roundabouts on emissions and fuel consumption: a case study. *Transp Res Part D Transp Environ* 7(1):65-71. doi:[10.1016/S1361-9209\(01\)00011-6](https://doi.org/10.1016/S1361-9209(01)00011-6)
- Wang Z, Wu Y, Zhou Y, Li Z, Wang Y, Zhang S, Hao J (2013). 澳门和日本的汽油乘用车的实际排放量。

它们与驾驶条件的关联性。 *Int J Environ Sci Technol* 1-12

