

中国典型城市空间形态对居民出行能耗的影响

郭洪旭¹ 黄莹² 赵黛青² 肖荣波^{1,*} (1. 广东省环境科学研究院 生态环境与土壤修复研究所, 广东 广州, 510045; 2. 中国科学院 广州能源研究所, 广东 广州, 510640)

【摘要】以我国5个典型城市为研究对象,应用其2000~2010年的样板数据,分析人口密度与居民出行能耗的关系,并通过STIRPAT模型评估不同人口密度条件下,城市空间形态和居民社会经济属性对居民出行能耗的影响,得出以下主要结论:①居民收入是影响我国典型城市居民出行能耗的关键因子,其次是城市空间形态要素。②人口密度与人均出行能耗呈显著负相关,与欧美城市相比,我国典型城市人口密度对居民出行能耗的影响更显著。③当人口密度大于200人/hm²时,其对出行能耗的抑制作用迅速增强,建成区面积对出行能耗的影响不显著,万人公交车保有量的提高会导致居民出行能耗升高。④当人口密度小于200人/hm²时,建成区面积是影响居民出行能耗的关键因子,建成区面积越大,居民出行能耗越高;万人公交车保有量的提高能有效抑制居民出行能耗的增长。

【关键词】城市空间形态;居民出行能耗;人口密度;中国

【中图分类号】TU984.1 **【文献标识码】**A

0 引言

城市空间形态(urban form)与居民出行之间的关系一直是城市地理、城市规划、交通规划等领域的热点问题,而在全球气候变暖的背景下,城市空间形态对居民出行能耗的影响已经成为各研究领域的前沿^[1]。

城市空间形态涉及的内容十分广泛,包括为人类活动而提供的所有人造环境^[2]。从空间尺度上讲,城市宏观尺度的空间结构、中观尺度的土地利用形态、微观尺度的居住区建成环境,均属于城市空间形态的研究范围。在城市不同尺度,国内外学者针对城市空间形态对居民出行的影响开展了大量的研究。城市宏观尺度的研究主要探讨单中心和多中心的城市空间结构对交通流向、出行方式、通勤时间和通勤距离的影响^[3]。城市中观尺度的研究通常选取人口密度、建成区面积、公交可达性等指标表征城市空间形态,分析其对居民出行的影

响^[1]。城市微观尺度的研究主要分析居住区规划设计对居民出行的作用。

在城市中观尺度的研究中,以欧美城市的案例较为多见,重点探讨城市的紧凑发展和低密度蔓延对居民出行的影响。在衡量城市紧凑特征的指标中,人口密度是反映空间集中程度的重要指标之一,且众多研究围绕人口密度进行展开。研究普遍认为高密度紧凑发展的城市空间形态有助于降低居民出行能耗,高人口密度和混合开发的区域,居民更倾向于短距离出行,非机动出行比例更高,因而出行能耗更低^[4,5]。然而,该尺度的已有研究多反映城市空间形态与居民出行之间的相关性,针对二者之间作用效果的分析稍显薄弱^[6,7]。

受城市空间形态和居民出行数据缺乏的限制,我国在城市中观尺度的相关实例研究还较为少见。由于城镇化和背景的差异,我国城市空间形态与欧美城市存在巨大差异。仅以人口密度为例,已有欧美城市的研究案例中,人口密度多在50人/hm²左右,而我国北京、上海、广州等城市人口密度基本在200人/hm²左右,重庆等城市人口密度最高时甚至接近1000人/hm²。在人口密度已经极高的背景下,已有欧美城市的研究理论是否仍然适用于我国城市?不同人口密度条件下,城市空间形态关键指标和居民社会经济属性对出行能耗的作用效

基金项目:国家自然科学基金项目(41501184);国家“十二五”科技支撑项目(2012BACB01、2012BACB04、2012BAC20B12);广州市科技计划项目(2014J4100112)

* 通讯作者:肖荣波(1978-),男,博士,广东省环境科学研究院、教授级高级工程师。主要从事低碳城市、城市生态研究。E-mail:ecoxiaorb@163.com

果如何?都是亟需研究的科学问题。

鉴于此,本研究以北京、上海、广州、天津和重庆为样本,应用5个城市2000~2010年的样板数据,分析人口密度与居民出行能耗的关系,进而根据城市人口密度将城市划分为低密度城市和高密度城市,通过STIRPAT模型评估不同人口密度条件下,城市空间形态和居民社会经济属性对居民出行能耗的影响,揭示不同人口密度条件下,主要城市空间形态指标对居民出行能耗的作用效果,为我国城市的低碳发展提供科学依据。

1 研究数据与方法

1.1 研究方法

研究应用STIRPAT模型评估城市空间形态以及主要的居民社会经济属性对居民出行的影响。STIRPAT模型是用来评估人口、富裕度和其他因素对环境影响的重要研究方法,目前已经被广泛地应用于生态、社会和经济领域^[8-11],该模型最早由Dietz等人依据Erllich提出的环境影响框架而建立,最初的规范等式如下^[12,13]:

$$I_i = \alpha P_i^\beta A_i^\gamma T_i^\delta e_i \quad (1)$$

式中, I_i 、 P_i 、 A_i 、 T_i 代表解释变量, α 、 β 、 γ 、 δ 是评估参数, e_i 是随机误差。本文将STIRPAT模型作为理论和分析框架,将城市形态和居民社会经济属性引入模型,并对式(1)两边取对数,检验STIRPAT模型中驱动因素对居民出行能耗的作用弹性,公式表达如下:

$$\ln E_{it} = \alpha_i + \beta_1 \ln D_{it} + \beta_2 \ln S_{it} + \gamma \ln I_{it} + \delta \ln P_{it} + \varepsilon_i + e_{it} \quad (2)$$

式中 i 代表城市, t 代表年份, E 代表城市居民人均出行能耗(MJ/人),为居民日常工作、生活、学习出行(不含外地出差、旅行)使用机动交通工具产生的能耗,具体计算方法为:加总全市私家车能耗和公共交通能耗求得城市居民出行能耗总量,其与全市常住人口的比值即为人均出行能耗,公共交通能耗以全年公交客运量乘以单耗计算得到; D 代表城市人口密度(人/hm²), S 为城市建成区面积(hm²),用以表征城市规模, D 为城市常住人口与 S 的比值; I 代表城市居民人均可支配收入(以2000年不变价计算), P 代表公共交通资源的丰富程度,以万人公共汽车拥有量表示, α 和 ε 分别代表个体和时间效应, e 是误差项。由于模型被取成对数,因而变量的

系数能直接解释为弹性系数。

依据以上模型原理分别构建3组固定模型。模型1将所有城市样本的城市空间形态参数和社会经济属性参数带入STIRPAT模型进行计算,分析各变量对居民出行能耗的总体影响。在此基础上,依据典型城市的人口密度,将样本划分为低密度城市样本和高密度城市样本,分别构建模型2和模型3,探讨不同人口密度条件下,城市空间形态和居民社会经济属性对居民出行能耗的作用弹性。

1.2 研究数据

研究以北京、上海、广州、天津和重庆为典型样本,应用5个城市2000~2010年11年的私家车能耗、公共交通能耗、人口密度、建成区面积、人均可支配收入、万人公共汽车拥有量等面板数据,依据STIRPAT模型的主要理论框架,构建回归模型,定量分析我国典型城市空间形态和居民社会经济属性对居民出行能耗的影响。

城市人口、人均可支配收入取自各市统计年鉴;居民私家车出行能耗数据取自《中国能源统计年鉴》(2001~2011)和《广州统计年鉴》(2001~2011);城市建成区面积、万人公共汽车拥有量、公交客运量等数据取自《中国城市统计年鉴》(2001~2011)。公交单耗取自公开发表的文献^[14]。依据式(2),在SPSS软件中对数据进行处理分析。

2 结果与分析

2.1 典型城市的人口密度和居民出行能耗特征

5个典型城市中,重庆的人口密度最大,2010年接近400人/hm²,2000年人口密度最高时接近1000人/hm²,2000~2010年期间,平均人口密度为566人/hm²。2000~2010年期间,5个典型城市人口密度平均值排序依次为:重庆(566人/hm²)>上海(251人/hm²)>天津(207人/hm²)>广州(152人/hm²)>北京(149人/hm²)。近十年间,受城镇化和行政区调整的影响,5个典型城市人口密度均呈现降低趋势(图1)。

5个典型城市中,北京的人均出行能耗最大,2010年为5584MJ,2009年人均能耗最高时接近6000MJ;2000~2010年期间,人均出行能耗增长迅速,从1600MJ增长至接近6000MJ。5个典型城市中,重庆的人均出行能耗最小,2000~2010年的11年期间,平均人均出行能耗仅有230MJ,尽管2008

年之后,其居民出行能耗也增长迅速,但其2010年的人均出行能耗仅为707 MJ,约为北京的1/8。5个典型城市近十年人均出行能耗排序依次为:北京(3770 MJ) > 上海(2251 MJ) > 广州(1749 MJ) > 天

津(1591 MJ) > 重庆(229 MJ)。近10年间,受居民生活水平提高、快速城镇化等因素的影响,典型城市的居民出行能耗迅速提高(图2)。

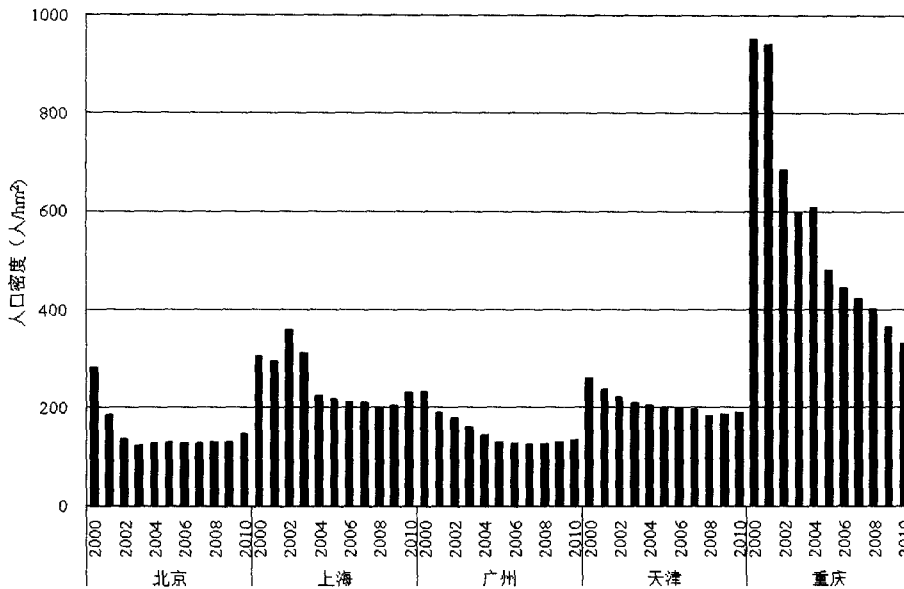


图1 中国典型城市人口密度

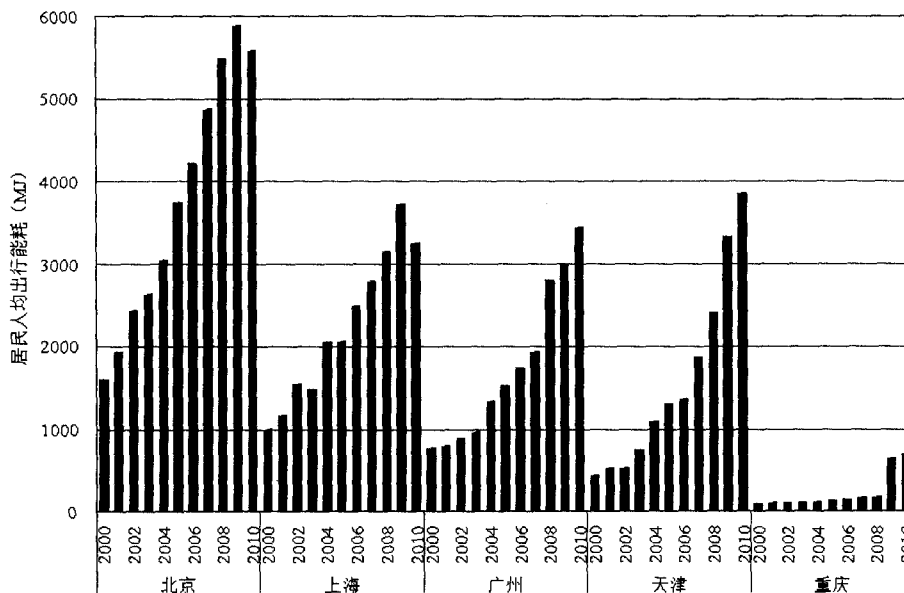


图2 中国典型城市居民人均出行能耗

2.2 人口密度与居民出行能耗的相关性

利用我国典型城市的人口密度和居民人均出行能耗制作散点图。从图3(左)可以看出,我国城市人口密度与人均出行能耗呈显著负相关,总体趋势与欧美城市基本一致(图3(右))。比较图3左右

两图可以发现,我国典型城市人口密度远大于欧美城市,人口密度基本在100~400人/hm²之间,而欧美城市人口密度多为25~100人/hm²左右;从居民人均出行能耗来看,欧美城市人均能耗主要集中在10000MJ到20000MJ之间,而我国典型城市最高人

均出行能耗不足 6000MJ,大多在 2000MJ 左右,远低于欧美城市;单从人均能耗与欧美城市的比较来

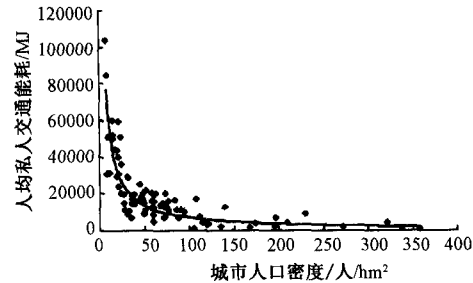
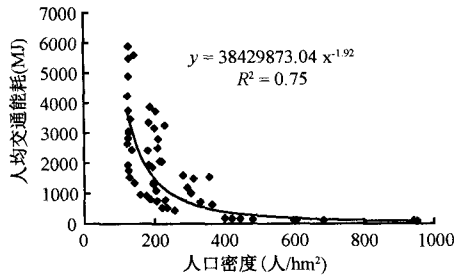


图3 中国(左)和欧美(右)^[15-18]典型城市人口密度与人均出行能耗的关系

从人口密度与人均出行能耗的相关性来看,欧美城市两个变量之间的相关系数为 -0.5 ,通过1%水平上的显著性检验^[15-18];而样本区二者之间的相关性更高,相关系数达到 -0.864 ,通过1%水平上的显著性检验,说明人口密度对我国城市的影响更为显著。从散点图的拟合曲线来看,我国典型城市人口密度在 200 人/ hm^2 时,对居民出行能耗的影响出现拐点,当人口密度大于 200 人/ hm^2 时,人均出行能耗迅速降低。而欧美城市的拐点是 50 人/ hm^2 。

以上分析,只考虑居民出行能耗与城市人口密度单一因素的关系,旨在发现城市人口密度增加对出行能耗影响的某一方面的规律。因而,研究继续分析城市形态其他属性以及居民社会经济属性对居民出行能耗的影响,以全部样本数据构建“全部城市 STIRPAT 模型”,以人口密度 200 人/ hm^2 为临界点,将样本数据划分为低密度城市样本和高密度城市样本,分别构建“低密度城市 STIRPAT 模型”和“高密度城市 STIRPAT 模型”,分析城市空间形态、居民社会经济属性对居民出行能耗的总体影响,以及不同人口密度条件下各因子对出行能耗的作用差异。

2.3 城市空间形态对居民出行能耗的影响

依据 STIRPAT 模型理论框架构建的固定效应模型的估算结果显示(表1),三个面板模型的 R^2 都较接近1,说明面板模型拟合效果较好。

从“全部城市 STIRPAT 模型”的模拟结果来看,居民收入、人口密度和公交数量对出行能耗的弹性系数分别为 1.306 、 -0.654 和 -0.89 ,均在1%水平下显著。表明收入的增长是影响居民出行的关

看,我国城市未来的增长空间还十分巨大。

键因素,且与居民出行能耗具有正相关。目前我国正处于城镇化快速发展时期,居民收入的迅速提高引起私家车需求的爆发性增长,并导致居民出行能耗的迅速提高,因而应从城市规划和公共交通的组织方面加强研究与实践,构建低碳城市空间。

表1 动态面板模型估计结果

	全部城市	低密度城市	高密度城市
	固定效应模型	固定效应模型	固定效应模型
	系数	系数	系数
lnI	1.306***	0.753***	1.847**
lnD	-0.654***	-0.271***	-0.880***
lnS	0.003	2.700***	-0.666
lnP	-0.890***	-1.489***	0.769**
常数项	-4.007	-18.978***	-3.246*
调整后 R ²	0.871	0.947	0.897

注:***表示在1%水平下显著,**表示在5%水平下显著,*表示在10%水平下显著。

人口密度对居民出行能耗的弹性系数为 -0.654 ,表明高人口密度能够抑制居民出行能耗。主要原因是高人口密度有利于居民步行,同时更容易组织公共交通。万人公交车拥有量对居民出行能耗的弹性系数为 -0.89 ,表明公共交通服务水平的改善能有效降低居民出行能耗,且作用高于人口密度和建成区面积的影响。

2.4 不同人口密度条件下城市空间形态对居民出行能耗的影响

在不同城市人口密度条件下,影响居民出行能耗的关键因子对居民出行能耗的作用存在显著差异。

当人口密度低于 200 人/ hm^2 时,居民收入、人口密度、建成区面积和万人公交车拥有量对居民出行能耗的弹性系数分别为 0.753 、 -0.271 、 2.7 和

-1.489,均在1%水平显著。因而,对于低密度城市而言,建成区面积是影响居民出行能耗的关键因素,建成区面积过大会导致居民出行能耗迅速提高;结合实际情况来看,低密度城市样本主要为北京和广州2002年之后的样本数据,二者2010年建成区面积分别达到1350km²和952km²,而人口密度为5个城市中最低的两个,城市低密度蔓延的趋势较为严重,导致居民出行能耗较高。万人公交保有量对出行能耗的弹性系数为负,且绝对值仅小于建成区面积的弹性系数,表明提高公交数量能有效降低居民出行能耗。居民收入的增加会促进居民出行能耗的增长,而人口密度的提高有助于降低居民出行能耗,但相对于建成区面积和万人公交保有量,二者的作用较弱。

当人口密度大于200人/hm²时,居民收入对出行能耗的影响作用最大,弹性系数达1.847,主要原因是高密度城市机动出行的便捷性差、成本高,而收入高低是决定私家车出行的重要因素。人口密度对交通能耗的弹性系数为-0.880,远大于低密度城市面板模型的弹性系数,表明当人口密度达到一定水平后,人口密度的增加对居民出行能耗的抑制作用更显著。万人公交保有量对居民出行能耗的弹性系数为0.769,表明高密度城市单纯依靠提高公交车数量有可能导致居民出行能耗增加,主要原因是样本城市为我国经济相对发达的城市,公交基础设施较为完善,单纯提高公交车数量并不一定能提高公交的服务水平,同时有可能导致一定程度的空载。建成区面积对高密度城市居民出行能耗的影响不显著。因而,针对高密度城市,不能单纯依靠提高公交数量来降低居民出行能耗,在保证人口高密度紧凑发展的条件下,需要结合土地混合利用、步行环境优化、轨道交通建设等综合措施来优化城市空间形态。

3 结论

本研究首先分析了我国典型城市人口密度和居民出行能耗的主要特征,继而利用典型城市的面板数据构建STIRPAT模型,评估了不同人口密度条件下,城市空间形态和居民社会经济属性对居民出行能耗的影响,得到以下结论并提出政策建议。

3.1 主要结论

(1)自2000年之后,我国典型城市人口密度持

续降低,居民出行能耗强度快速增长。居民收入是影响我国典型城市居民出行能耗的关键因子,其次是城市空间形态要素。

(2)人口密度与人均出行能耗呈显著负相关,与欧美城市相比,我国典型城市人口密度对居民出行能耗的影响更显著。

(3)当人口密度大于200人/hm²时,居民人均出行能耗迅速降低,居民收入是决定出行能耗的关键因素,人口密度的提高对出行能耗的抑制作用比低密度城市更为显著;万人公交车保有量的提高会导致居民出行能耗升高。

(4)当人口密度小于200人/hm²时,建成区面积是决定居民出行能耗的关键因子,建成区面积越大,居民出行能耗越高;万人公交车保有量的提高能有效抑制居民出行能耗的增长。

3.2 政策建议

1)我国典型城市人口密度与居民人均出行能耗呈显著负相关,而我国正处于城镇化快速发展时期,城市规模持续扩大,但人口密度却逐年降低,城市低密度蔓延趋势显著,为居民出行能耗的增长提供了空间。因而应从城市规划和公共交通的组织方面加强研究与实践,控制城市规模,提高土地集约利用,促进城市人口集聚发展。

2)建成区面积的大小是决定低密度城市居民出行能耗强度的关键因子,而公共交通服务水平的提升能有效降低居民出行能耗强度。因此,对于低密度蔓延城市,应注重对建成区面积、城市规模等因素的控制,同时提高公共交通服务水平。

3)居民收入是决定高密度城市居民出行能耗强度的关键因子,人口密度的提高对居民出行能耗的抑制作用更为显著,而单纯提高公交数量有可能提高居民出行能耗强度。因此,对于高密度城市,应多从经济政策手段入手,提高机动出行成本,并结合土地混合利用、步行环境优化、轨道交通建设等综合措施来优化城市空间形态。△

【参考文献】

- [1] 龚咏喜,李贵才,林姚宇,段仲渊.土地利用对城市居民出行碳排放的影响研究[J].城市发展研究,2013,(09):112-118.
- [2] Handy SL, Boarnet MG, Ewing R, Killingsworth RE. How the built environment affects physical activity: Views from urban planning[J]. *American Journal of Preventive Medicine*, 2002, 23: 64-73.

- [3] 丁成日. 城市空间结构和用地模式对城市交通的影响[J]. 城市交通 2010, (05):28-35.
- [4] Newman PWG, Kenworthy JR. The land use-transport connection - An overview[J]. *Land Use Policy*, 1996,13:1-22.
- [5] Newman P W G KJR. Gasoline consumption and cities: A comparison of US cities with a global survey [J]. *Journal of American Planning Association*, 1989,55:24-37.
- [6] Yin Y, Mizokami S, Maruyama T. An analysis of the influence of urban form on energy consumption by individual consumption behaviors from a microeconomic viewpoint [J]. *Energy Policy*, 2013,61:909-919.
- [7] Liu C, Shen Q. An empirical analysis of the influence of urban form on household travel and energy consumption[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2011,35:347-357.
- [8] York R, Rosa EA, Dietz T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts[J]. *Ecological Economics*, 2003,46:351-365.
- [9] Shi AQ. The impact of population pressure on global carbon dioxide emissions, 1975 - 1996: evidence from pooled cross-country data[J]. *Ecological Economics*, 2003,44:29-42.
- [10] Martinez-Zarzoso I, Bengochea-Morancho A, Morales-Lage R. The impact of population on CO2 emissions: evidence from European countries[J]. *Environmental & Resource Economics*, 2007,38:497-512.
- [11] 姜磊, 季民河. 基于 STIRPAT 模型的中国能源压力分析——基于空间计量经济学模型的视角[J]. 地理科学, 2011:1072-1077.
- [12] Dietz T, Rosa EA. Effects of population and affluence on CO2 emissions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1997,94:175-179.
- [13] Ehrlich PR, Holdren JP. Impact of population growth [J]. *Science*, 1971,171:1212-1218.
- [14] 陆化普, 王建伟, 张鹏. 基于能源消耗的城市交通结构优化[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004:383-386.
- [15] Karathodorou N, Graham DJ, Noland RB. Estimating the effect of urban density on fuel demand[J]. *Energy Economics*, 2010,32:86-92.

作者简介:郭洪旭(1984-),男,博士,广东省环境科学研究院工程师。主要从事低碳城市、城市生态研究。

收稿日期:2015-12-22

Impact of Urban form on Private Travel Energy Use of Typical City in China

GUO Hongxu, HUANG Ying, ZHAO Daiqing, XIAO Rongbo

[Abstract] In this paper, panel data from 2000 to 2010 of five typical city in China used to analyze the effect of population density on private travel energy use. And then, the STIRPAT model was created to estimate the effect of urban form and residents' income on private travel energy use in different population density. The results are as follow. ① Income is the major determinants which influence on the private travel energy use most, followed by the urban form factors. ② The private travel energy use has negative correlation with population density, compare with European and American city, the negative correlation are more marked. ③ When the population density is greater than 200 persons per square hectares, the effect of population density on private travel energy use will rapidly increased, and the effect of built up area is insignificant, more bus may elevate energy use. ④ When the population density is smaller than 200 persons per square hectares, the built up area is the key factor, the bigger the city develops, the more private travel energy use, more bus may help decrease energy use.

[Keywords] Urban Form; Private Travel Energy Use; Population Density; China