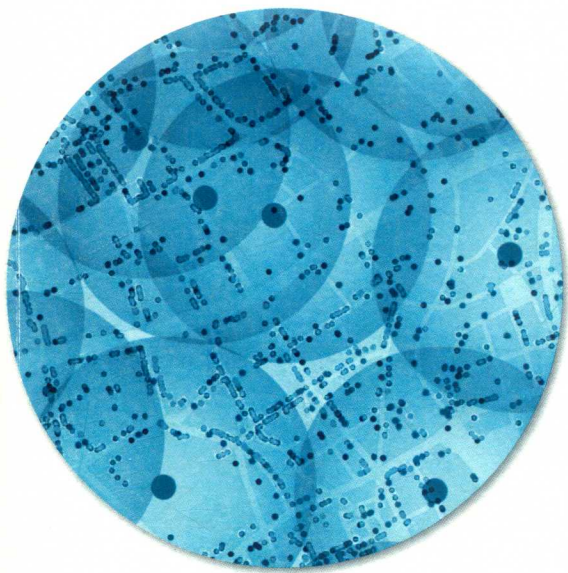




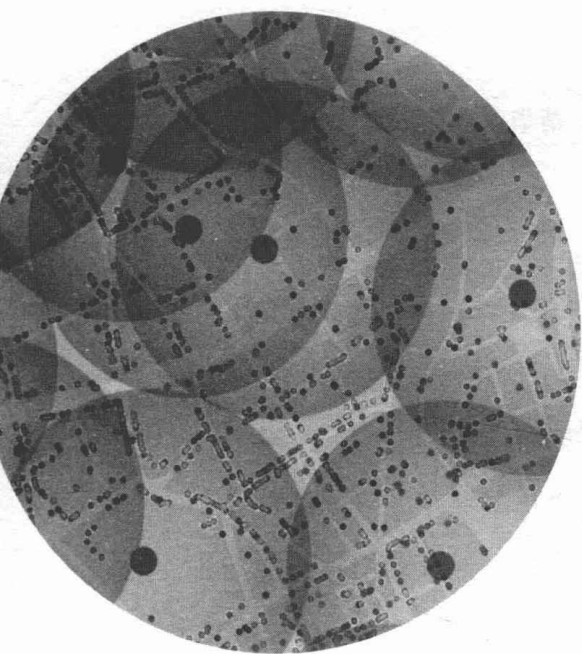
节能城市与住区 空间形态研究

Morphology Of
Energy-efficient City
And
Neighborhood

张 杰 毛其智 著
解 扬 陈 骁



清华大学出版社



节能城市与住区 空间形态研究

Morphology Of
Energy-efficient City
And
Neighborhood

张 杰
解 扬



清华大学出版社
北京

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

图书在版编目（CIP）数据

节能城市与住区空间形态研究 / 张杰等著 .—北京：清华大学出版社，2018
ISBN 978-7-302-51066-6

I . ①节… II . ①张… III . ①①城市—居住区—节能设计—研究
IV . ① TU241

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 190795 号

责任编辑：徐 颖

装帧设计：彩奇风

责任校对：王荣静

责任印制：杨 艳

出版发行：清华大学出版社

网 址：<http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址：北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编：100084

社总机：010-62770175 邮 购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈：010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印装者：三河市春园印刷有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：185mm×250mm 印 张：17 字 数：264 千字

版 次：2018 年 10 月第 1 版

印 次：2018 年 10 月第 1 次印刷

定 价：89.00 元

产品编号：063292-01

序 言

本书主要是在清华大学自主科研计划资助项目“华北南部地区特大城市节能住区形态与设计研究”(20111081052)工作的基础上完成的。课题工作始于2011年11月,至2014年12月完成。课题的部分工作还分别得到美国能源基金会资助项目“节能城市设计研究”课题(G-1008-13176,2008—2012年)、低碳能源大学联盟资助项目“低碳城市设计:从选择评估到政策实施”课题(2011LC002,2011—2014年)的资助。此后,研究团队的主要成员又用了近3年的时间对成果进行了整合、深化和完善,形成了目前的成果。

在20世纪70年代石油危机爆发、城市无序蔓延日益严重的大背景下,有的学者开始利用城市经济学模型,在理论上探讨城市规模与交通拥堵的关系^①。之后随着能源消耗数据逐渐可以获取,20世纪80年代起一些学者开始关注城市形态与能源消耗之间的实证关系,其中以纽曼(Newman)和肯沃西(Kenworthy)(1989)基于全球32个城市1980年的人均汽油消耗量、人口密度等数据的研究最具有代表性^②。这一研究直接揭示了城市人口密度与人均汽油消耗量之间明显的负相关关系,继而引发了学术界对城市形态与能源消耗之间实证关系的研究热潮。随后大量城市规划和交通领域的专家开始投入到城市形态与交通行为及能源消费的研究之中。比如可持续城市形态的“3Ds”理论的提出^③。“D”这一名称

① Mills E S, De Ferranti D M. Market choices and optimum city size[J]. The American Economic Review, 1971: 340-345.

② Newman P G, Kenworthy J R. Cities and automobile dependence: an international sourcebook[M]. Gower Publishing, 1989.

③ Cervero R, Kockelman K. Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design[J]. Transportation Research D, 1997, 2(3): 199-219.

来自几个以字母 D 开头的单词,代指三个维度的形态变量:密度(density)、混合度(diversity)和设计(design)。“3D”理论奠定了建成环境影响居民出行行为的理论基础,指出高密度、多样性、步行友好设计的城市建成环境有助于通过引导低碳出行方式、提升短距离出行比例、降低机动车出行距离等多种途径降低居民出行能耗。除此之外,城市形态的其他维度,如城市规模、中心度、紧凑度等也被证实对居民日常出行有着巨大影响。之后,该理论得到进一步发展,扩充至“6Ds”^①。增加的三个维度分别为目的地可达性(destination accessibility)、公交设施可达性(distance to transit)和需求管理(demand management)。

现有生活能耗研究重点关注住宅建筑特征,以及家庭成员特征和家庭外部条件等与家庭生活能耗的关系,而少有研究探讨中微观尺度的住区形态对生活能耗的影响。与生活能耗有关的住区形态因素主要包括住宅特征(面积、类型等)、密度(建筑密度、人口密度等)、平面布局(建筑排布方式、街道走向等)和绿化(植被类型、规模等)四方面的内容;其他生活能耗影响因素包括建筑围护结构、设备性能和使用行为等^②。由于影响因素非常多,变量之间存在复杂的相互作用,所以住区形态对生活能耗的影响并非总是稳定、有效的。有的学者认为,住区形态要素对家庭生活能耗大约只有 10% 的影响^③。有的学者则认为,在各类因素对生活能耗的贡献率中,建成环境最高占 2.5 份,设备能效 2 份,使用行为 2 份,肯定了建成环境的影响力^④。不管如何,对成千上万的城市住区而言,通过各种住区形态设计手段所实现的累计效应仍能达到相当可观的节能效果。

综上所述,空间形态对家庭能耗的影响已被绝大多数研究所证实,通过形态设计手段促进节能减排也是大部分研究所认同的一个潜力方向。但对于形态

① Ewing R, Cervero R. Travel and the built environment[J]. Transportation Research Record, 2001, 1780(1): 87-114.

② Ko Y. Urban form and residential energy use: A review of design principles and research findings[J]. CPL Bibliography, 2013, 28(4): 327-351.

③ Ratti C, Baker N, Steemers K. Energy consumption and urban texture[J]. Energy and Buildings, 2005, 37(7): 762-776.

④ Baker N, Steemers K. Energy and environment in architecture: a technical design guide[M]. Taylor & Francis, 2003.

与家庭能耗关系中的一些具体问题还存在争议：（1）宏观城市结构与能耗之间的几个亟待解决的问题，包括针对发展中国家的研究少，研究选取的形态指标少；（2）微观住区形态与能耗之间关系的几个亟待解决的问题，比如住区形态的描述变量有待丰富，形态影响能耗的作用机制有待详细阐述，居民自我选择与环境决定的作用孰轻孰重等。本书就是以这几个问题为导向，开展以节能为目的的城市和住区层面的空间形态探讨。

2008—2012年，在美国能源基金会的资助下，清华大学等学校和美国麻省理工学院（以下简称“MIT”）开展了“节能城市设计研究”领域的合作研究，清华、MIT团队通过联合城市教学共同探索了低碳城市参数系统、量化测度低碳城市形态的方法。MIT方面提出了相关模拟计算模型。在研究过程中，清华团队开始注意到MIT方面提出的模拟计算模型和能耗方程（The Energy Performa）存在的一些概念与理论问题。为了更科学地把握中国城市空间形态与居民能耗之间的规律，清华大学团队在清华大学自主科研基金项目的支持下，独立开展了相关研究。

我们首先展开了城市层面的研究，从全国286个地级以上城市分析了城市空间结构与居民能耗的关系，发现中国城市综合节能效果较好的城市的人口规模在200万～500万。在这一规模范围内，研究结合气候分区分析，锁定了第二建筑气候分区内能耗潜力较大、具有可比性的济南、石家庄、郑州、太原4个城市进行重点研究。在兄弟团队的协助下，我们收集了4个城市70多个不同区位、类型的住宅区的空间形态数据，以及其中7000多个家庭的问卷资料。丰富的数据为课题通过数学模型进行量化研究提供了坚实的基础。

在住区层面的研究中，研究团队针对案例城市住区空间形态与居民能耗的特点，研究出了一系列新的数学模型指标、数据处理方法等，并结合实际情况对模型分析的结论展开了深入分析。很多结论对指导未来新区居住区规划建设和老旧住区的节能改造有借鉴价值。

在整合城市与住区两个层面的研究中，本书提出了一些以往研究未涉及的问题，比如住区层面的密度与城市整体密度之间的联动对城市居民能耗可能产生的

影响，避免了仅从中、微观单一层面孤立观察密度与居民能耗相互作用的局限。这对后续该领域的研究或许是一个重要启发。

本书将设计、教学、科研密切结合，在研究过程中，清华大学建筑学院与 MIT 建筑与城市规划学院成功举办了 5 次以低碳城市为题材的城市设计联合工作坊。清华大学建筑学院很多博士和硕士研究生结合论文研究方向或城市设计课程参与了相关的课题研究工作。在过去的 8 年中，清华团队在国内外重要杂志发表相关学术论文近 20 篇，完成博士论文多篇。这一项目实现了科研与教学的有机结合。

目 录

第一章 研究概述 /001

第一节 问题提出与研究框架 /002

一、家庭能耗的定义与分类 /002

二、空间形态与家庭能耗 /003

三、研究框架 /006

第二节 案例城市的选择 /007

一、城市规模与效率的平衡区间 /007

二、地域：气候分区与能耗 /018

三、研究城市的确定 /023

第三节 案例城市概况 /025

一、自然经济社会条件 /025

二、空间演变历程 /031

三、规模与密度特征 /038

第二章 城市空间结构与居民交通能耗 /049

第一节 城市空间结构影响居民交通能耗的理论解释 /051

一、个体出行行为的时空特点 /051

二、“3Ds”与居民交通能耗 /053

三、城市内部多中心层级结构与居民交通能耗 /056

- 第二节 城市空间结构影响居民交通能耗的实证分析 /058
 - 一、我国城市空间结构的度量维度 /058
 - 二、“3Ds”与居民交通能耗的回归分析 /067
 - 三、中心度与居民交通能耗的回归分析 /072
- 第三节 案例城市空间结构与能耗 /077
 - 一、案例城市能耗特点 /078
 - 二、案例城市功能多样性特征 /080
 - 三、案例城市路网形态特征 /095
 - 四、案例城市中心度特征 /097

第三章 样本住区形态特征 /107

- 第一节 研究方法 /108
 - 一、研究设计 /108
 - 二、样本住区选择 /116
- 第二节 平面与空间形态 /124
 - 一、容积率 /124
 - 二、建筑密度 /127
 - 三、楼栋平面形式 /128
 - 四、住宅特征 /130
- 第三节 绿地系统 /134
 - 一、绿地率 /134
 - 二、布局形式 /135
- 第四节 服务设施 /137
 - 一、范围划定 /137
 - 二、分类标准 /138
 - 三、服务设施特征 /139

第五节 道路与公交系统 /148

一、住宅区出入口 /148

二、路网密度 /150

三、公共交通 /153

第四章 家庭生活能耗与住区形态的关系 /159

第一节 家庭生活能耗的计算与总体特征 /159

一、家庭生活能耗的内涵与计算 /160

二、四城市家庭生活能耗总体特征 /161

三、案例城市家庭生活能耗比较 /165

第二节 空调能耗与住宅区形态 /167

一、空调使用概况 /168

二、家庭空调能耗模型 /169

三、空调能耗与住宅区形态描述分析 /174

四、空调能耗与住宅建筑形态描述分析 /185

第三节 采暖及照明能耗与住宅形态 /186

一、采暖能耗与住房面积 /186

二、照明能耗与朝向 /187

第五章 家庭交通能耗与住区形态的关系 /191

第一节 家庭交通能耗的内涵与计算 /192

一、家庭交通能耗分类 /192

二、交通能耗的计算方法 /194

第二节 家庭交通能耗总体特征 /195

一、四城市家庭交通能耗 /195

二、四城市家庭交通能耗比较 /198

- 第三节 家庭非通勤能耗模型 /200
 - 一、理论模型 /200
 - 二、不同因素与非通勤能耗的关系概述 /203
- 第四节 非通勤能耗与住区形态 /206
 - 一、家庭交通工具保有情况 /206
 - 二、家庭交通工具与住区形态的关系 /208
 - 三、非通勤出行及能耗特征 /210
- 第五节 非通勤能耗与中心可达性、服务设施等的关系 /215
 - 一、中心可达性 /215
 - 二、服务设施 /219
 - 三、路网形态 /226
 - 四、公共交通 /227
 - 五、停车管理 /228

第六章 结 论 /231

- 第一节 节能城市形态讨论 /232
 - 一、城市规模：鼓励发展和完善 200 万～500 万人口的大城市 /232
 - 二、容积率：提倡“1km² 1 万人”的新区建设强度 /234
 - 三、多样性与路网形态层面：倡导小网格、高混合度的城市设计 /234
 - 四、中心度：构建城市内部多层次中心结构 /236
- 第二节 节能住区形态讨论 /239
 - 一、容积率与建筑密度的适当组合配以开敞空间大疏大密的布局，有利于降低空调能耗 /239
 - 二、采暖能耗方面：提倡发展小户型，保障小户型住宅区的居住环境 /242
 - 三、非通勤能耗方面：提倡集中绿地共享与高层多层住宅区相结合的住区形态 /243

四、营建方便的服务设施网络 /244

五、探索新的街区类型 /246

第三节 研究创新与展望 /246

一、研究意义 /246

二、研究创新 /247

三、后续研究展望 /249

附 录 /251

附录 1：样本住宅区编码 /252

附录 2：家庭生活能耗计算方法 /253

附录 3：家庭通勤能耗计算公式 /255

附录 4：家庭非通勤能耗计算公式 /257

致 谢 /258

第一章

研究概述

第一节 问题提出与研究框架

一、家庭能耗的定义与分类

能源消耗（简称“能耗”）一般可分成直接能耗与间接能耗，前者指生产、生活过程中对能源的直接消耗量，后者指产品生产、生活过程中所消耗的、各部门产品（原材料、辅助材料、机器设备等）中所包含的能源之和^[1]。相对而言，直接能耗的数据获取比较容易，因此，一般规划领域的节能研究都选择城市直接能耗作为分析对象。

城市直接能耗一般可分成生产直接能耗、生活直接能耗和交通直接能耗三大部分。生产直接能耗是指产品生产过程中对能源的直接消耗量。交通直接能耗指的是城市所有客运、货运车辆对能源的直接消耗量。生活直接能耗也就是一般所指的居民能耗，是城市规划领域研究的重点，指城市居民生活过程中对能源的直接消耗量。

一般来说，居民能耗的统计计算通常有两种单位，一种以居民个人为单位统计，本书在以下叙述时简称为“居民能耗”；另一种以家庭为统计单位，以下简称为“家庭能耗”。宏观研究主要从年鉴数据中获取能耗信息，大部分以个人为单位统计，因此宏观研究侧重“居民能耗”。微观研究则大部分以家庭入户问卷为能耗信息来源，因此微观研究的能耗对象多为“家庭能耗”。多数研究将家庭能耗分成家庭生活能耗和家庭出行能耗两部分。前者指的是城镇住宅建筑中，为家庭成员或使用者提供采暖、通风、空调、照明、炊事、生活热水，以及其他为了实现住宅的各项服务功能所使用的能源^[2]，不包含交通能耗和间接生活能耗。换句话说，就是以家庭为单位，研究发生在住宅内的各类直接能源消耗。后者指的是家庭出行过程中产生的能源消耗，通常可以根据出行目的分成上下班、上下学出行产生的通勤能耗以及购物、服务等其他目的出行产生的非通勤能耗。

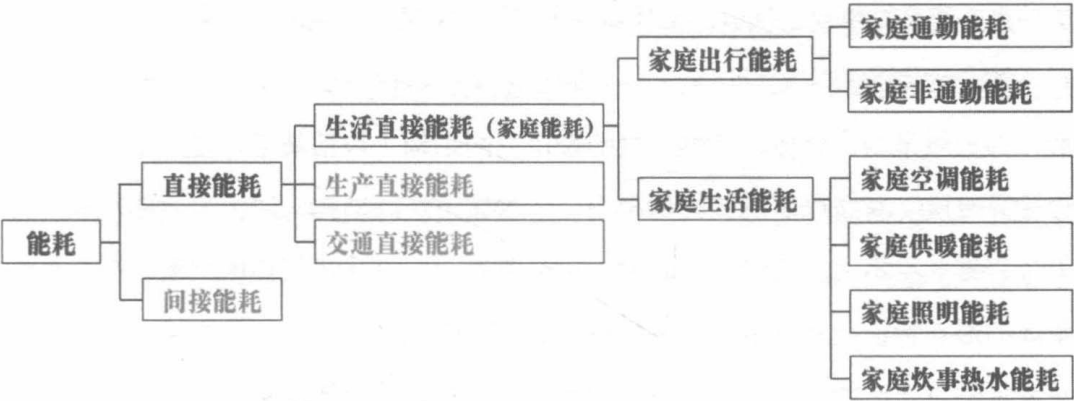


图 1-1 城市能耗分类与结构示意图

家庭能耗在社会能耗总量中占有很大比重。从全球范围来看，居住建筑产生的碳排放占总量的 11%，商业 / 公共建筑产生的碳排放占总量的 7%，交通过程产生的碳排放占总量的 15%。^①发达国家的经验显示，即使完成了工业结构升级与调整，节能形势依然严峻，其中居民消费的能源会不断增长。居民住宅面积的增加、家用车保有量的激增、居民生活水平的提高都会导致能源消费量的持续上升。1978 年美国居民能耗占总能耗比例为 20.4%，工业能耗占比 40.9%；2010 年美国居民能耗占比 22.6%，工业能耗占比却下降到 30.7%^[3]。2010 年，欧盟 27 国家庭、贸易和服务消耗的一次能源消耗量占总量的 28.22%，而工业能耗则只占 16.58%，生活服务类能耗远远超过工业能耗^②。我国长期将提高能源效率、降低能源强度的重点放在工业领域^[4]，然而居民生活能耗和交通能耗同样需要得到关注与研究。

二、空间形态与家庭能耗

居民能源消费行为（如出行与使用电器等）是一个复杂的决策过程，既会受到行为主体自身年龄、性别、职业、收入等社会、经济条件的影响，也会受到其所处的物质环境、文化习惯、价值取向的影响。其中空间形态（建成环境）与人类行为

① 资料来源：<http://www.ecofys.com/files/files/asn-ecofys-2013-world-ghg-emissions-flow-chart-2010.pdf>。
② 资料来源：欧盟统计局网站，<http://epp.eurostat.ec.europa.eu>。

的关系一直是城市规划领域,尤其是城市设计与交通规划领域的研究热点^[5-14]。

综合现有的家庭能耗研究,从空间尺度上,可以分成三个大类:一是城市层面,即把城市当作整体,考察宏观的城市空间结构(包括城市密度、中心度、混合度等维度)对居民交通能耗的影响,因为城市空间结构与居民生活能耗从理论上说直接关系不大,所以一般研究只关注前者。二是建筑与住区层面,考察住宅单体的形态特征以及群体组合特征对居民生活能耗及交通能耗的影响。此类研究一般更侧重生活能耗。三是设备层面,着眼更具体的能耗设备,如空调、供暖系统和家用电器等,分析家庭的生活能耗。

对于家庭出行能耗方面,Cervero和Kockelman提出的“3Ds”理论开辟了建成环境影响居民出行行为的理论基础,指出高密度、多样性、步行友好设计的城市建成环境有助于通过引导低碳出行方式、提升短距离出行比例、降低机动车出行距离等多种途径降低居民出行能耗^[5]。除此之外,城市形态的其他维度,如城市规模、紧凑度、中心度等也被证实对居民日常出行有着巨大影响。

①城市规模:北美^[15]、欧洲^[16]、日本的实证研究^[17]已证实,大城市会消耗更高的人均交通能耗。大城市的居民一般有着更大的活动范围,通勤距离普遍更长,因而产生更多的交通能耗^[18]。

②紧凑度:大量实证研究证实多组团城市、组团边界规整(减少飞地的出现)的城市边界形态有助于减少过长的居民交通出行,比如万霞、陈峻与王伟^[19]基于国内17个城市的交通数据,重点探讨了组团式城市和非组团式城市中家庭汽车出行行为的异同;该研究表明,与组团式城市相比,非组团式城市的家庭汽车出行时耗更大,而且随城市规模增大,非组团式城市的家庭汽车出行时耗将显著增大,组团式城市的家庭汽车出行时耗却稳定在20分钟左右。

③中心度:有关单中心与多中心城市结构的能源效率被广泛讨论,得出的观点大相径庭。一方面,对于出行方式,多中心结构城市居民更加依赖小汽车出行是学者们的一个共识^[20-27]。另一方面,关于城市结构对出行时间/距离的影响,学者之间分歧较大。多中心支持者^[28-33]认为,家庭和企业总是周期性地通过空间位置的调整来实现居住—就业的平衡,从而使交通总量降低并且分散在更广的

区域里,达到缩短通勤距离和通勤时间的目的。单中心论支持者^[20-23, 25-27]认为,就业的分散化即多中心结构没有达到就业—居住的平衡,导致城市居民通勤距离和通勤时间增加。

对于家庭生活能耗方面,贝克(Baker)等曾利用模型和现场调查数据计算了各类因素对生活能耗的贡献率,其中建成环境最高占2.5份,设备能效2份,使用行为2份,肯定了建成环境的影响力^[34]。

在各项建成环境要素中,住宅面积和类型受到的关注最高,二者不仅对生活能耗具有显著影响^[35-38],同时还与家庭收入、成员数量等非形态因素有关^[39]。住宅结构类型、围护结构、立面材料与色彩、建成年代等建筑要素对能耗的影响已通过工程方法得到了证实^[40, 41]。Kaza和江海燕等的研究则认为房龄与能耗有关^[42, 43]。

除了建筑因素外,住区空间形态(主要包括密度、平面布局和绿化三个方面)也被认定对家庭生活能耗有显著影响。国外研究常使用人口或住宅数量密度表示地区维度的居住密度,研究发现居住密度高的地区生活能耗较低,为紧凑型城市开发策略提供依据^[44, 45]。国内学者习惯用容积率和建筑密度表示居住密度。江海燕等研究认为容积率与生活碳排放正相关^[42],霍焱等的结论则正好相反^[46]。平面布局包括选址、建筑排布组合方式、道路走向、朝向等。绿化包括规模、与住宅位置关系、植被种类等。Cheng等利用3D模拟技术研究发现,平立面变化丰富、建筑密度较低的住区照明能耗更低^[47]。海斯勒(Heisler)和多诺万(Donovan)等发现树木与住宅的相对位置与室内温度和能耗有关^[48, 49]。胡永红等认为绿地率、植被类型和单块绿地面积对住区温度有显著影响^[50]。但这些研究都是采用工程方法进行的,平面布局及绿化与生活能耗在统计方法上的证据还非常有限^[51]。

综上所述,空间形态对家庭能耗的影响已经被绝大多数研究所证实,通过形态设计手段促进节能减排也是大部分研究所认同的一个潜力方向。但对于形态与家庭能耗关系中的一些具体问题还存在争议:①宏观城市结构与能耗之间几个亟待解决的问题,针对发展中国家的研究少,研究选取的形态指标少;②微观住区形态与能耗之间关系的几个亟待解决的问题,比如住区形态的描述变量有待丰富,