

# 国外城市形态对住宅能耗影响研究及对我国的启示

## Foreign Researches About the Influence of Urban Form on Residential Energy Consumption and Its Enlightenment to China

吴巍 宋彦 洪再生 卢一华

Wu Wei, Song Yan, Hong Zaisheng, Lu Yihua

**摘要:** 明确住宅能耗的影响因素, 提高住宅能耗的使用效率是实现低碳城市建设的有效途径。城市形态作为影响住宅能耗的重要因素, 国外早已从多个方面对其展开研究。通过归纳现有研究成果, 文章首先概括了城市形态对住宅能耗的影响机制; 其次分别从住宅形式、树木、地表覆盖物、密度、社区布局等五个方面介绍了各因素与住宅能耗的关系; 最后从未来研究和规划建议两个方面提出了对我国的启示。

**Abstract:** It is an effective way to construct low-carbon city by determining the influence factors of residential energy consumption and improving the efficiency of energy consumption. As an important factor of affecting the residential energy consumption, urban form has been studied in many aspects by foreign scholars. Based on the existing research results, this paper first summarizes the influence mechanism of urban form on residential energy consumption. Then, it introduces the influence of different urban form factors on residential energy consumption, the urban form factors includes: housing form, planting, surface coverage, density and community layout. Finally, this paper puts forward the enlightenment to China from two aspects: future research and planning suggestion.

**关键词:** 城市形态; 住宅能耗; 低碳城市

**Keywords:** Urban Form; Residential Energy Consumption; Low-carbon City

GEF 城市规模建筑节能和可再生能源 (P130786)

**作者:** 吴巍, 天津大学建筑学院博士研究生, 美国北卡罗来纳大学教堂山分校联合培养博士研究生。254992540@qq.com  
宋彦 (通信作者), 深圳大学城市规划系教授; 美国北卡罗来纳大学教堂山分校城市与区域规划系终身教授, 博士生导师。ys@email.unc.edu  
洪再生, 天津大学建筑设计规划研究总院, 院长、博士生导师。td\_design@126.com  
卢一华, 宁波市规划设计研究院, 工程师。362865535@qq.com

## 引言

住宅能耗是继交通能耗、工业能耗之后全球第三大能源消耗主体, 约占全球总能耗的 30%<sup>[1]</sup>。各个国家发展情况不同, 住宅能耗使用情况亦有所差别。依据美国能源信息管理局提供的国际能源展望数据, 通过比较 2015 年美国、经济合作与发展组织国家以及非经济合作与发展组织国家的能耗发现: 就全球层面来说, 美国家庭能源消耗占全球家庭能源消耗的 17%, 经济合作与发展组织国家占 43%, 非经济合作与发展组织国家占 57%; 就国家层面来说, 美国家庭能源消耗占全国能源消耗的 21%, 这一比例超过了经济合作与发展组织国家 (20%) 和非经济合作与发展组织国家 (15%)。因此有必要探究影响住宅能耗的因素, 这些因素以何种方式影响着住宅能耗使用以及影响程度如何, 进而采取有效措施减少住宅对能耗的需求, 提高住宅能耗使用效率。目前普遍认为住宅能耗的影响因素包括地域气候、地区经济、城市形态、建筑节能措施、使用者行为等, 本文重点讨论城市形态对住宅能耗的影响。

国外早在 20 世纪 70 年代就已经从城市形态角度展开了对住宅能耗影响的研究——通过选取城市建成环境中的各种形态因素, 分析各形态因素与其环境下住宅能耗的关系, 进而明确城市形态对住宅能耗的影响作用。由于我国相关研究起步较晚, 现有研究成果相对较少, 本文在归纳国外研究成果的基础上, 力求总结城市形态对住宅能耗的影响机制以及各形态因素在影响住宅能耗过程中所起的作用, 以期为我国相关研究和规划建设提供借鉴。

## 1 城市形态对住宅能耗的影响机制

城市中各种实体要素和城市社会经济条件通过多样的土地利用方式表现出来的空间分布、结构形式和发展模式的不同状态即为城市形态。现有的相关研究将城市形态划分为两个层面, 即宏观层面和微观层面: 宏观层面主要指社区甚至更大尺度的城市形

态，微观层面主要指建筑尺度的城市形态。不同层面的城市形态会对住宅产生不同的作用，本文通过将这两个层面的研究成果归结在一起，从而更加全面地展示城市形态对住宅能耗的影响。

住宅能耗指的是住宅建筑对能源的需求，它反映了人们在住宅建筑里为了满足对日常生活需求而消耗的能源总量。与住宅相关的能源包括电力、天然气、煤炭等，其中电力能源是住宅消耗的主要能源。

住宅作为城市的有机组成部分，不同的城市形态会对住宅产生直接的影响。例如，不同的城市规模、中心区形状、建设密度等会影响到住宅的紧凑程度；城市内其他构成要素（如道路、植被等）的组合分布还会影响到住宅对采光、通风以及保暖等的需求。合理的城市规划设计可以有效地减少用于满足这些需求的能耗，因此可以说城市形态能够对住宅能耗产生重要的影响。

城市形态对住宅能耗的影响机制如图 1 所示。城市形态中各因素或者若干因素的组合可以通过改变住宅所处环境的微气候进而影响住宅对能耗的需求。例如，不同类型的住宅其室内热交换性能亦有所差别，城市中树木和地表覆盖物的特性可以影响住宅所在区域的城市热环境，居住区密度与城市热岛效应密切相关，建筑和街道的朝向直接关系到太阳能入射、风能利用等问题。这些微气候又会直接影响到家庭日常供热、制冷、采光、通风等能耗需求。

下节将具体描述城市形态各因素对微气候的影响作用以及各形态因素与住宅能耗的关系。

2 城市形态各因素与住宅能耗的关系

城市形态的构成要素包括：建筑、道路、植被、水体以及开敞空间等，各要素的不同特征（物理特征和非物理特征）均会对城市微气候环境产生影响。住宅作为城市的组成部分，分析这些要素与微气候间的关系可以进一步明晰城市形态对住宅能耗的影响。

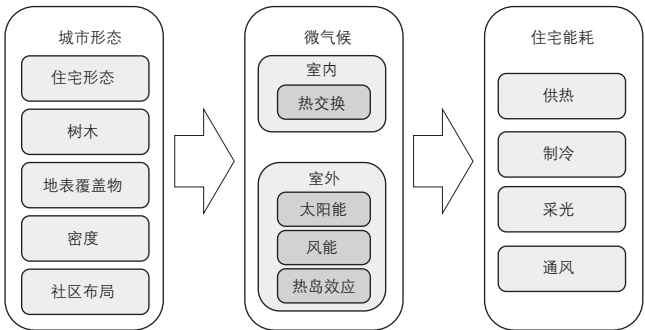


图 1 城市形态对住宅能耗影响机制

通过整理现有文献的研究成果可以将影响住宅能耗的城市形态因素分为三类，即住宅单体类、城市景观类、城市设计类。其中，住宅单体因素指的是住宅形式，城市景观因素包括树木和地表覆盖物，城市设计因素指的是开发密度和社区布局，每种因素又包含了许多不同种类的城市形态指标，如表 1 所示。

2.1 住宅形式

研究住宅形式对能耗的影响主要包括住宅类型和住宅大小两个方面。住宅类型通常分为单户独立住宅（single-family housing）和多户住宅（multifamily housing）。这两种不同的住宅类型对能耗的影响可以借助研究建筑能耗的重要指标——被动式体量率——来解释。被动式体量率，即建筑表面积与体积之比，该指标可以较好地反映建筑的蓄热能力。多户住宅或者单户拼接住宅的建筑存在内部共享墙体，因此建筑蓄热能耗可以在其内部进行转换；而单户独立住宅建筑的共享墙体较少，更多的是直接暴露在外部的墙体和屋顶，因此建筑蓄热能耗受户外影响较大。对于给定的建筑体量，由于单户独立住宅具有更多的建筑外表面积，即体形系数比多户住宅或者单户拼接住宅大，因此这类住宅更容易散失或得到热量，进而需要消耗更多的能耗来满足房屋的蓄热需求。现有的研究成果也普遍支持这一种观点。例如，卡扎（Kaza）

表 1 各类城市形态指标汇总表

类别	城市形态因素	分析指标	对住宅的影响
住宅单体类	住宅形式	房屋类型	不同类型和不同大小的房屋会影响住宅的供热和制冷能耗需求，体形系数主要影响住宅的蓄热性能
		体形系数	
		房屋大小	
城市景观类	树木	树木方位	不同方位的树木、不同形状的树冠会产生不同的遮阳效果，也会影响住宅的通风，树木覆盖率会影响住宅周围环境整体温度
		树冠形状	
		树木覆盖率	
	地表覆盖物	草地覆盖率	不同面积的草地、道路、水体对太阳能的反射程度亦不相同，进而影响城市的热岛效应，建筑外表面颜色和材质的差异也会影响建筑及周围的温度
		道路特征	
		水体面积	
		建筑外表面	
城市设计类	开发密度	住宅建筑密度	建筑密度、楼间距、街道高宽比等指标主要影响住宅的采光与太阳能利用，各种密度指标还会影响城市热岛效应
		建筑间距	
		街道宽度	
		街道高宽比	
	社区布局	建筑物朝向	建筑物朝向、水平和垂直方向的组合主要影响住宅的采光和太阳能利用，街道朝向主要影响住宅的通风
		街道朝向	
		建筑水平方向组合	
		建筑垂直方向组合	

利用美国 2009 年住宅能耗调研数据分析出单户住宅类型家庭平均能耗是多户住宅类型的 2 倍, 单户住宅人均用能是多户住宅的 1.4 倍, 单户独立住宅能耗和 5 单元及以上多户住宅能耗之间差距最大, 前者是后者的 2.3 倍<sup>[2]</sup>。

住宅大小同样也可以显著影响住宅能耗。一般而言, 在没有采取节能措施的情况下, 房屋的体积越大, 则需要更多的能耗来满足居民日常的生活用能需求。现有的研究成果也普遍认为住宅体积越大能耗需求越高。例如, 耶康 (Yekang Ko) 关于美国加州萨克拉门托地区的研究发现, 当控制了其他变量, 住宅体量增加 10%, 夏季制冷所需的能耗会增加 1.9%<sup>[3]</sup>。多诺万 (Donovan) 等人利用 2009 年美国住宅能耗调研数据分析出当其他条件一定时, 高度相同的住宅面积每增加 1 平方英尺 (约合 0.09 m<sup>2</sup>), 家庭每年平均能耗需求增加 488 791 千瓦时<sup>[4]</sup>。

## 2.2 树木

树木是影响住宅能耗的重要因素。许多研究显示, 树木可以通过多种方式有效减少住宅能耗需求。首先, 树木产生的树荫落在建筑表面和地面可以有效降低建筑表皮温度, 进而使住宅减少对制冷能耗的需求。例如, 阿克巴里等人 (Akbari et al.) 在萨克拉门托发现拥有树荫的住宅比没有树荫的住宅可以节省约 30% 制冷能耗<sup>[5]</sup>。其次, 树木的蒸腾作用也可以影响建筑周围的微环境, 间接起到减少住宅能耗的作用。黄姓学者等人 (Huang et al.) 的研究发现蒸腾作用对住宅能耗的影响甚至可以达到树荫效果的 3~4 倍<sup>[6]</sup>。第三, 树木既可以改变空气流动方向来提高自然通风, 也可以阻止冷空气对建筑表面和内部的侵袭, 进而减少住宅对热能的需求。例如, 麦克弗森等人 (McPherson et al.) 通过实验的方法分析了北达科他州北部、宾夕法尼亚州、新泽西州的树木对住宅能耗的影响, 研究结果显示树木具有防风罩的功能, 可以节省住宅约 3%~40% 不等的热能需求<sup>[7]</sup>。得瓦勒 (DeWalle) 对美国宾州住宅能耗的研究发现, 一个距小型防风林 3m 远的移动住宅冬季取暖最高可节省 18% 能耗<sup>[8]</sup>。第四, 树木和其他植物也可以通过减少空气和地表温度来缓和城市热岛效应, 进而影响住宅能耗需求。罗森菲尔德等人 (Rosenfeld et al.) 对洛杉矶住宅能耗进行了研究, 指出树木通过缓和城市热岛效应进而间接起到节能的效果非常显著, 洛杉矶高峰时段空调减少能耗需求约 1.5 GW<sup>[9]</sup>。

需要注意的是, 选择合理的位置种植树木很重要。耶康等人 (Yekang Ko et al.) 的研究认为在 60 英尺 (约合 18.3 m) 半径的缓冲带内, 将树木种植在房屋的东、南和西侧有利于降低夏季制冷用电量, 其中, 与其他方位种植树木的效果相比, 西侧种植树木节能效果是东侧种植树木的 2 倍,

是南侧种植树木的 1.8 倍。据估算, 将树木种植在房屋西侧带来的经济效益是种植在其他方位的 3 倍<sup>[10]</sup>。此外, 树木品种的选择同样重要。耶康等人的研究对象为落叶树种, 这是因为在夏季可以凭借树叶提供树荫, 在冬季树叶凋落后允许太阳能入射, 但若换成针叶树或是把树木种植在房屋北侧, 节能效果则不明显<sup>[10]</sup>。

## 2.3 地表覆盖物

地表覆盖物 (surface coverage) 是指城市形态中实体要素暴露在城市空间中的部分, 属于城市景观的一部分, 如草地、道路、建筑表面、水体等。通常针对这些实体要素的表面特征进行研究, 利用其渗透性、色彩和物理特性分析其对住宅能耗的影响。作为一个很重要的城市形态因素, 现有研究证明, 地表覆盖物可以通过改变城市热环境而影响住宅能耗。一般来说, 白天城市热效率与土地利用和地表覆盖物密切相关, 无渗透区域即城市建成区或工业区的温度相对较高, 而植被和水体覆盖区域温度相对较低<sup>[11]</sup>。耶康等人的研究发现, 当控制了其他变量, 100 英尺 (约合 30.5 m) 半径内的绿地空间密度与夏季制冷用电量呈负相关关系, 即绿地空间密度越大, 制冷用电量越低<sup>[10]</sup>。斯东 (Stone) 和他的同事研究地表覆盖物和亚特兰大热岛效应的关系时重点观察了没有渗透性的覆盖物 (如道路) 对热排放和地表温度的影响<sup>[12]</sup>。研究证明低密度建设、大面积暴露的表面是地表温度升高的主要原因。他们的研究结论提供了一个与传统观念——密度越高导致城市热岛效应越强——截然不同的观点。因此, 他们建议规划师通过合理的树木和建筑物的布局促进小地块、少开敞空间和多阴影的高密度发展模式。

此外, 地表颜色和物理特征同样会影响住宅能耗。许多来自劳伦斯伯克利国家实验室 (Lawrence Berkeley National Laboratory) 的城市热岛研究组的研究建议, 对于现存的和新建的城市, 使用浅颜色的屋顶、街道和其他非渗透性覆盖物可以增加他们对太阳能的反射度, 是减少能源使用经济有效的措施。其中, 阿克巴里等人 (Akbari et al.) 分析了地表特征与能耗利用间的关系<sup>[13]</sup>。研究认为地表覆盖物可以通过直接和间接两种方式影响住宅能耗: 首先, 建筑物屋顶以及建筑表皮覆盖物可以直接影响住宅的制冷能耗需求; 其次, 建筑物外表面、城市道路、绿地、水体等其他地表覆盖物可以通过影响城市热岛效应, 改变城市户外温度而间接影响住宅对能耗的需求。分析结果显示, 大规模范围内运用可以缓解城市热岛效应的地表覆盖物材质可以减少国家 20% 的空调用能, 可以节省环境能耗总资本约 100 亿美元。此外, 曹美春等人 (Cao et al.) 的研究表明, 具有高反射性能的屋顶可以有效降低夏季城市气温<sup>[14]</sup>。



## 2.4 开发密度

密度可以分为两类,规划角度更倾向于关注住宅单元密度,而建筑角度则往往关注紧凑性。住宅单元密度对住宅能耗的影响是一个复杂的充满争议的话题。一些研究认为,高密度住宅单元有助于缓解城市热岛效应,从而降低住宅能耗使用。皮特(Pitt)对布莱克斯堡的研究发现,不考虑其他节能措施的作用,位于高密度住宅单元的家庭相比原始低密度住宅的家庭可以减少35.5%的温室气体排放<sup>[15]</sup>。也有一些观点认为,现代化城市里建筑本身也会产生过多的热,高密度的城市形态不利于建筑的热散失,同时加剧城市热岛效应,增加住宅制冷能耗的需求<sup>[16]</sup>。高密度的住宅单元还会造成建筑间的相互遮挡,从而影响被动式太阳能和主动式太阳能的利用,进一步增加住宅能耗的需求。最近的研究还发现,密度通过其他中间变量,如住宅类型、房屋大小和人均收入等,间接影响住宅能耗。一般来说,住宅单元密度与住宅类型和房屋大小密切相关,在住宅单元密度较大的地区(如城市中心区),住宅类型多为多户住宅;而在住宅单元密度较低的地区(如城市蔓延区),住宅类型多为单户独立住宅,单户独立住宅面积普遍大于多户住宅。尤因(Ewing)的研究认为,城市蔓延区的人们习惯居住面积较大的单户独立住宅,虽然高密度社区住宅单元平均能耗比城市蔓延区低20%左右,但这主要是受住宅类型的影响所致<sup>[17]</sup>。

紧凑性描述了单位面积内建筑之间空间的紧密程度,常用街道宽度、建筑间距以及街道的长宽比等城市形态指标来衡量,其中街道长宽比是分析空间紧凑性对住宅能耗影响最重要的指标。对于住宅建成环境来说,街道长宽比可以通过太阳辐射、建筑阴影、通风廊道等影响住宅的供热和制冷能耗需求。现有研究成果表明,低长宽比的街道可以为太阳辐射提供更多的空间,提升建筑周围的室外温度,尤其是在冬天太阳较低的时候可以显著降低住宅对供热能耗的需求<sup>[18]</sup>。不仅如此,低长宽比的街道还可以提供更多的自然通风,在炎热气候下,通风廊道对降低住宅制冷能耗具有重要作用,但是大量的太阳能射入会抵消通风廊道带来的影响<sup>[19]</sup>。而高长宽比的街道当其与风向一致时容易产生风洞或“街道峡谷”效应,对于干热地区最好的布局是将狭窄蜿蜒的街道与盛行风相匹配,街道两侧紧凑布局高低错落的建筑,这样不仅会缓解强劲的风速驶入街道,也能提高街区的自然通风<sup>[20]</sup>。此外,高长宽比的街道可以让建筑物之间彼此产生遮阳的效果<sup>[21]</sup>。不同地区建筑物间的遮阳效果可以产生截然相反的作用:住宅位于低纬度地区则可以凭借建筑物本身的相互遮挡降低室内温度;而对于高纬度地区的住宅来说,由于建筑物阻挡了太阳能的入射效果,因此住宅会产生更高的热能需求。

## 2.5 社区布局

社区布局是指城市中各种实体要素在社区范围内的分布和组合。不同的建筑朝向、街道朝向以及空间布局等因素均会对住宅能耗产生显著的影响。其中,建筑朝向是保证住宅能够接收到充足日照和太阳能辐射的关键因素,可有效降低住宅用于采光和供热所需的能耗,对于建筑组团更是如此。在北半球地区,将住宅布置在朝南 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 之间是获得太阳能最理想的朝向<sup>[22]</sup>。以伦敦为例,将建筑从正南朝向改为正西朝向,会减少太阳能辐射量,对于被动式太阳能房屋需要多消耗16%能耗来满足房屋供热需求,对于传统房屋则需要多消耗9%能耗。需要注意的是,分析建筑朝向对住宅能耗的影响还需同时考虑建筑间距,在气候炎热的暖冬地区,除非建筑间距可以减少太阳能辐射,否则南向建筑会增加住宅制冷能耗的需求。

布满建筑物的街道朝向往往决定了建筑的朝向,许多社区布局都倾向于街道呈东西朝向布局以便可以满足建筑呈南北朝向,这样可以产生更多的南向立面,最大化利用太阳能。耶康等人利用萨克拉门托市公用事业用电数据分析了制冷用电与城市形态间的关系。研究发现,当控制了其他变量,街道朝向会对住宅夏季制冷能耗产生影响,与东西朝向的街道布局相比,南北朝向、西北—东南朝向以及东北—西南朝向的街道均可能导致夏季制冷用电量增加<sup>[10]</sup>。

由于不同的建筑布局形式会直接影响住宅利用太阳能的效率,因此建筑物在水平和垂直方向上的布局是另一个影响住宅能耗的重要因素。孔帕尼翁(Compagnon)利用3D模拟研究了在密度较高的环境中如何通过最佳建筑布局设计实现更高的太阳能利用效率<sup>[23]</sup>。他为高密度邻里环境设计了四种布局假设,通过比较水平方向和垂直方向不同的组合方案发现,统一高度的带状布局和非统一高度的阶梯式布局,太阳能利用效率最高。程姓学者等人(Cheng et al.)基于三维度的变量,即统一或自由的水平和垂直布局(图2)、容积率和建筑密度,利用3D模拟测试了一系列建筑布局形式对能耗的影响。他们发现水平和垂直方向的自由布局、低建筑密度、更多开敞空间的建筑布局形式可以增强日光射入量和太阳能潜力<sup>[24]</sup>。

## 2.6 城市形态对住宅能耗影响小结

(1) 住宅单体类。住宅形式通过对室内热环境产生作用而直接影响住宅能耗,与其他影响因素通过对室外微气候产生作用而间接影响住宅能耗相比,住宅形式的影响程度高于其他影响因素。不仅如此,住宅大小亦与开发密度密切相关,一般城市(高密度)多户住宅比郊区(低密度)单户住宅面积小,因此所需的温度调节能耗相对较低。此外,由于

单户独立住宅比多户住宅能耗需求量大,并且住宅大小与住宅能耗呈正相关关系,因此应该提高住宅的紧凑性,同时制定新的建筑规范,促进住宅能耗效率。

(2) 城市景观类。树木被认为是住宅室外微气候产生影响程度最高的因素,其可以通过控制太阳能射入、蒸腾作用、自然通风和调节城市热岛效应来有效减少温度调节能耗。虽然部分地区的树荫增加了取暖负荷,但是树木对节省能耗具有积极的净效益。通过研究地表覆盖物对住宅能耗的影响证明,减少建筑物和道路的暴露面积,增加绿化面积可以有效减少城市热岛效应,将建筑物的屋顶、外墙和路面改用浅色材料可以增加其对太阳能的反射率,是降低住宅能耗的一种有效方法。

(3) 城市设计类。密度和社区布局可以通过改变太阳能射入量、自然通风、热交换和城市热岛效应来影响住宅能耗。但是密度与住宅能耗的正负效应关系存在争议,这主要是由于不同气候条件下,住宅对空间温度调节能耗需求不同所致。此外,住宅所处的维度和气候环境不同,有利于节约能耗的建筑朝向和间距、街道朝向和高宽比以及建筑水平和垂直布局组合方式亦有所差别。因此,未来研究密度和社区布局形式对住宅能耗的影响应该充分考虑住宅所在位置和气候环境等因素,以便找到合理的、能够为各种区位环境带来净效益的城市设计策略。

### 3 对我国的启示

我国目前关于城市形态对于住宅能耗影响的研究相对较少。城市形态对能耗影响研究关注的重点更多侧重于城市形态对交通能耗的影响,不少研究分析了不同城市形态情况下交通出行能耗的差异。关于家庭能耗影响因素的研究往往侧重分析家庭特征和住宅节能措施对能源使用所起的作用,城市形态这一重要因素并没有作过多分析。因此通过对国外研究文献的归纳整理可以对我国未来相关研究和规划建议有所启示。

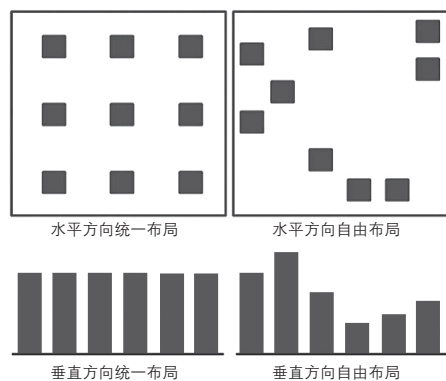


图2 水平和垂直方向建筑布局示意图

资料来源:参考文献[24]

### 3.1 对未来研究的启示

#### (1) 加强城市形态对住宅能耗影响的研究

城市形态作为影响住宅能耗的关键因素一直被我国学者所忽视,加强城市形态对住宅能耗影响的研究,并将研究成果及时转化到城市设计与建设中对于实现低碳城市具有重要的意义。在所有住宅能耗影响因素中,城市形态是最复杂的因素,由于其涉及多个城市形态变量,各变量会同时对住宅能耗产生影响,这就加大了分析每个变量与住宅能耗关系的难度;此外,每个变量又包含多种城市形态指标,且形态指标数值不易精确获取,都对研究带来了困难。因此,未来的研究可以尝试综合运用各种定性与定量的方法分析城市形态与住宅能耗的关系。其中,定性的分析方法可以采取描述分析、直观比较的方式解释两者间的关系;而定量分析则可以采用模拟分析、统计分析以及实验的方法探究城市形态各变量对住宅能耗的影响,以便最大限度优化研究结果。

#### (2) 选择合适的城市形态指标

由于我国不同地区发展水平和城市建设状况有所差异,所以研究过程中城市形态指标的选取应有所侧重。针对高密度开发地区,应重点关注住宅单元密度、街道高宽比、建筑间距等指标对住宅能耗的影响;而低密度开发地区,则应重点比较草地、树木、水体、道路面积等指标在影响住宅能耗中所起的作用;针对建筑形式比较统一的地区,应该重点分析建筑物朝向、建筑物在水平和垂直方向的组合等指标对住宅能耗带来的影响;而建筑形式多样的地区还应该分析房屋类型、体形系数以及房屋大小等指标与住宅能耗的关系。此外,国外城市房屋多以低层住宅为主,因此树木这一城市形态指标对住宅能耗影响程度较大,而我国城市房屋多以多层、小高层以及高层为主,相比较而言,树木这一城市形态指标并不适用于分析我国城市住宅能耗。因此,在进行相关分析时应选择合适的、具有代表性的城市形态指标进行研究。

#### (3) 注意研究结果的有效性

现有文献的研究结果是基于特定的地理区域、气候特征等条件得出的,住宅所处环境不同,城市形态对其影响亦有所差别。因此,特定区域各指标对住宅能耗的影响结果不能简单地运用到其他区域,一种节能的城市形态也不太可能普遍适用于所有城市。以我国东北地区 and 南部沿海地区为例。东北地区应侧重城市形态对房屋供热能耗影响的研究,而南部沿海地区则应该加强城市形态对房屋制冷能耗影响的研究。同样的住宅间距对于东北地区可能会增加太阳能入射程度,进而降低房屋供热能耗需求;而对于南部沿海地区则会因为有充足的太阳能入射而增加了房屋的制冷能耗需求。此外,东北地区需要合理的城市形态布局来减少冷空气对房屋的侵袭,而南部沿海地区则需要增加通风量来降低房屋制冷



能耗的需求。由此可见,针对不同区域的研究结果存在偏差属正常情况,未来不同城市的住宅能耗研究应结合自身特点,分析出符合特定环境下有利于节约住宅能耗的城市形态。

#### (4) 加强跨学科研究

由于住宅能耗受到多方面的影响,包括气候、城市形态、节能措施以及使用者行为等,因此未来研究应该探寻一种跨学科的方法,加强建筑领域、规划领域以及其他各领域研究人员间的协作,改善现有彼此间互通性较差的状况,以便在充分考虑各种影响条件下制定和实施可行的住宅节能设计和策略。不同领域的专家学者还可以相互配合研究关于城市形态与能耗间的成本—效益问题,以便从经济角度、环境角度等多方面分析城市形态对节约能耗的作用。除此之外,未来的研究不仅要关注住宅建筑,还应该研究城市形态对商业建筑、公共建筑等其他类型建筑能耗的影响,研究还可以延伸到社区规模,以实现更大范围内的节能。

### 3.2 对未来规划设计与政策建议的启示

#### (1) 优化城市形态,多种途径促进低碳城市建设

由于城市形态各变量均会对住宅能耗产生影响,因此优化各层面的城市形态对于促进低碳城市建设具有重要的意义。

就住宅单体层面的形态而言,由于房屋类型和大小对住宅能耗影响效果是相同的,即体形系数越大,房屋面积越大,住宅所需能耗越高。所以未来房屋设计要提高其空间利用效率,同样体积的住宅可以通过分割不同功能的房间来提高其空间设计的紧凑性,增加热量在房屋内部的传递效应,提高房屋的蓄热能力。住宅开发应主推中小户型,适当控制大户型在房地产市场中的比例。此外,太阳能、智能遮阳板等具有科技含量的节能措施也应该运用到住宅建筑建设当中。

就城市景观层面的形态而言,树木覆盖率可以提供更多的树荫,不仅可以减少城市热岛效应,而且落在住宅外墙的树荫对于减少家庭用能具有重要的作用。对于我国夏热冬冷地区、温和地区、夏热冬暖地区而言,树荫对减少住宅能耗使用的效果尤为明显。因此,在我国应该推广住宅周围的树木种植。其实,自1990年以来,美国许多城市都开始实施植树计划,每年为国家节省了大量的能源费用<sup>[25]</sup>。选择合适的树种,种植在合理的方位,对于节约住宅能耗同样具有显著的效果。我国南方地区适合种植落叶树种,夏季凭借树叶的遮阳效果可以减少制冷能耗,冬季树叶凋落后允许太阳能入射;而北方严寒地区更适合种植常绿树种,这是由于冬季常绿树种可以阻止冷风对住宅的侵袭,减少房屋的供暖能耗。同时,我国气候和纬度均与美国相似,通过借鉴他国经验,将树木种植在房屋的西侧和南侧,节能效果优于东侧和北侧。不仅如此,立体式绿化也应当在低纬度城市加以推广,它既

可以减少房屋制冷能耗需求,又可以起到美化城市环境的作用。此外,还应该注意城市中地表覆盖物、建筑物、构筑物表面色调的使用,一般来讲,浅色调外表面的城市实体要素可以有效减少建筑物及其周围能源使用,因此可以尽量使房屋屋顶、墙体以及道路表面等使用浅色调材质。早在2010年,纽约市曾推行过“白色屋顶计划”,规划师为了缓解城市热岛效应,减少住宅对能耗的需求,倡导将建筑屋顶粉刷成白色涂料。

就城市设计层面的形态而言,紧凑的规划布局可以被认为是低碳城市建设比较理想的城市形态。虽然目前建筑密度对于住宅能耗的影响存有争议,但我国人口密度较大,高密度开发有利于促进土地集约利用;此外,高密度建设往往意味着住宅套型更加紧凑,这对于减少住宅能耗的影响要高于建筑密度本身对能耗的影响。因此,应该在我国推广高密度的开发模式。同时,住宅朝南布置,有利于接收更多的日照和太阳能辐射。针对需要减少住宅供热能耗的地区,可以适当增加住宅楼间距,以便最大化利用太阳能。而针对需求减少住宅制冷能耗的地区,街道朝向应与当地常年最大风向相一致,以便获得更多的通风廊道。

(2) 将低碳城市形态设计纳入总体规划,为低碳城市建设提供实施保障

现有的研究成果与实际运用还存在一定的距离,使得研究与实践相脱离。为了避免这种尴尬的局面,可以考虑将低碳城市形态设计纳入城市总体规划,以便为其提供法定依据,同时还有助于将规划设计转化为实际行动。

在编制城市总体规划时,针对低碳城市形态的落实工作应提出具体的降低住宅用能总目标。其次,依据可以影响住宅用能的城市形态类别分别提出住宅单体、城市景观以及城市设计每类形态应该完成的节能目标。在此基础上,分别对每类形态实现节能的目标提出具体的实施政策,如图3所示。

有效的节能评估是低碳城市形态实施的重要保障。针对降低住宅用能目标开展的评估工作可以包含三个部分,即评估准备、评估实施和评估成果。其中,评估准备阶段应确定具体的评估人员和技术条件;评估实施阶段应该将总体规划中提到的住宅建筑节能政策设立为若干评估的目标,在此基础上再细化,制定每个评估目标应该完成的政策及若干行动要点,通过考核这些政策及行动来判断每个评估目标的实施情况,对于不符合评估要求的应提出改进措施;评估成果应以年度报告、评估报告以及规划修订建议等形式反馈到现行规划建设当中,起到完善规划设计与促进指标实施的作用。

注:未标明资料来源的图表均为作者绘制。

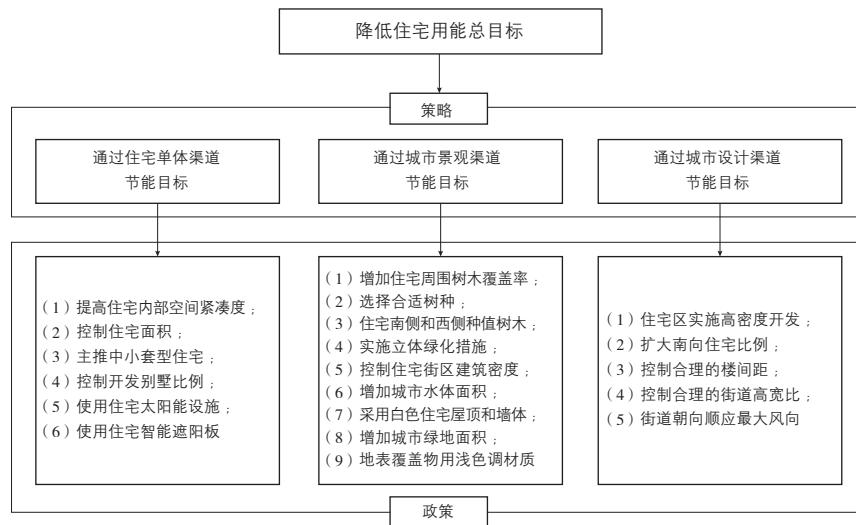


图3 总体规划“降低住宅能耗”实现方式

### 参考文献

- [1] SWAN L, ISMET U. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: a review of modeling techniques[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(8): 1819-1835.
- [2] KAZA N. Understanding the spectrum of residential energy consumption: a quantile regression approach[J]. Energy Policy, 2010, 38(11): 6574-6585.
- [3] YEKANG Ko, et al. Factors affecting long-term mortality of residential shade trees: evidence from Sacramento, California[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2015, 14(3): 500-507.
- [4] GEOFFREY H Donovan, DAVID T Butry. The value of shade: estimating the effect of urban trees on summertime electricity use[J]. Energy & Buildings, 2009, 41(6): 662-668.
- [5] AKBARI H, KURN DM, BRETZ SE, et al. Peak power and cooling energy savings of shade trees[J]. Energy & Buildings, 1997, 25(2): 139-148.
- [6] HUANG Y J, AKBARI H, TAHA H, et al. The potential of vegetation in reducing summer cooling loads in residential buildings[J]. Journal of Applied Meteorology, 1987, 26(9): 1103-1116.
- [7] MCPHERSON E G. Energy conservation potential of urban tree planting[J]. Journal of Arboriculture, 1993, 19(6): 321.
- [8] DEWALLE D R, HEISLER G M. Windbreak effects on air infiltration and space heating in a mobile home[J]. Energy & Buildings, 1983, 5(4): 279-288.
- [9] ROSENFELD A H, AKBARI H, ROMM J J, et al. Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction[J]. Energy & Buildings, 1998, 28(1): 51-62.
- [10] YEKANG Ko, LEE J H, MCPHERSON E G, et al. Factors affecting long-term mortality of residential shade trees: evidence from Sacramento, California[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2015, 14(3): 500-507.
- [11] ROTH M, OKE T, EMERY W. Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology[J]. International Journal of Remote Sensing, 1989, 10 (11): 1699-1720.
- [12] STONE B, NORMAN JM. Land use planning and surface heat island formation: a parcel-based radiation flux approach[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(19): 3561-3573.
- [13] AKBARI H, POMERANTZ M, TAHA H. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas[J]. Solar Energy, 2001, 70(3): 295-310.
- [14] CAO Meichun, Rosado P, LIN Z, et al. Cool roof in Guangzhou, China: outdoor air temperature reductions during heat waves and typical summer conditions[J]. Environment Science & Technology, 2015, 49(24): 14672-14679.
- [15] PITT D. Evaluating the greenhouse gas reduction benefits of compact housing development[J]. Journal of Environmental Planning and Management, 2013, 56(4): 588-606.
- [16] KRISHAN A, NICK Baker, SIMOS Yannas, et al. Climate responsive architecture: a design handbook for energy efficient buildings[M]. New Delhi, India: Tata McGraw-Hill, 2001.
- [17] EWING R, RONG F. The impact of urban form on US residential energy use[J]. Housing Policy Debate, 2008, 19(1): 1-30.
- [18] ALI-TOUDERT F, MAYER H. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate[J]. Building and Environment, 2006, 41(2): 94-108.
- [19] GOLANY GS. Urban design morphology and thermal performance[J]. Atmospheric Environment, 1996, 30(3): 455-465.
- [20] AGGARWAL R. Energy design strategies for city-centers: an evaluation[C]. 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, 2006(9): 6-8.
- [21] HOUGH M. Cities and natural process[M]. London, England: Routledge, 1995.
- [22] LITTLEFAIR P. Passive solar urban design: ensuring the penetration of solar energy into the city[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 1998, 2(3): 303-326.
- [23] COMPAGNON R. Solar and daylight availability in the urban fabric[J]. Energy & Buildings, 2004, 36(4): 321-328.
- [24] CHENG V, STEEMERS K, MONTAVON M, et al. Urban form, density and solar potential[C]. 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, 2006.
- [25] MCPHERSON E G, SIMPSON J R, et al. Potential energy savings in buildings by an urban tree planting programme in California[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2003, 2(2): 73-86.

(本文编辑：许玫)