

建筑节能低碳： 法兰克福与中国城市的对比

□ 蔡博峰/文

我国需要积极借鉴法兰克福的成功经验，首先在一些重点一线城市开始尝试建立建筑能源证书制度，评价不同建筑的能源消耗情况，并提出具体节能措施。

法兰克福 (Frankfurt) 是德国西部的大城市，位于黑森州的美因河 (Main River) 北岸，城市面积 248.31 平方千米，人口 68.8 万 (2010 年)，城市植被覆盖率非常高，达到 52%。法兰克福是欧洲金融中心之一，其国际机场是世界最大的机场之一；法兰克福也是欧洲少数几个有摩天大楼 (150 米以上的建筑) 的城市之一，德国 13 座摩天大楼中有 12 个坐落在法兰克福，还有两个摩天大楼 (欧洲中央银行总部和 Taunusturm 大楼) 正在建设当中。法兰克福气候温和，1 月份平均气温 1.4℃，7 月份平均气温 17℃，全年平均温度 10℃，年均降雨量 621 毫米 (气象数据是 1971-2000 年的多年平均值)。

法兰克福建筑的节能和低碳特征

1987 年法兰克福市的 CO₂ 排放量为 707 万吨，人均 11.4 吨，2009 年全市总 CO₂ 排放量为 650 万吨 (不包括交通)。法兰克福市的近期低碳目标是 CO₂ 排放每五年下降 10%，中期低碳目标是到 2030 年 CO₂ 排放相对 1987 年降低 50%，达到人均 5.7 吨，远期目标是实现人均 2 吨 CO₂ 排放水平。

1、建筑能耗和碳排放

在德国，建筑能源消耗约占全国能源消耗的 40%。因而建筑能耗在德国占据非常重要的地位，这也是德国高度重视建筑节能的重要原因之一，法兰克福

市是德国高效建筑的典型代表，也是德国严格建筑能效标准的积极倡导者和先行者。建筑采暖在德国建筑能耗中占据非常重要的比例 (超过 60%)，因而供暖能耗直接影响建筑能耗水平。

法兰克福市许多标志性的建筑建于 19 世纪以前，此类建筑能效水平较低，总能耗 (采暖+用电) 超过了 200 kWh/(m²·a)，但新建建筑，尤其是 2000 年以后许多新建建筑能效水平很高。随着建筑能耗的逐渐下降，以及热电联产、太阳能等的快速发展，法兰克福民用建筑总排放呈逐年下降趋势。

法兰克福市对于公共建筑 (市政、教育、医院等) 有非常严格的能耗标准，并且每年都实施大量公共建筑节能改造，这也是其公共建筑能耗水平较低的一个主要原因。法兰克福市公共建筑的能源消耗在 150~180 kWh/(m²·a) 左右。

为了实现建筑节能和低碳排放，法兰克福市针对建筑设定了明确的碳减排目标，其中：家庭用电——人均电力消费量控制在 1000 kWh/年；CO₂ 减排，2015 年 22.4 万吨，2025 年 32.7 万吨。居民住宅采暖——通过建筑节能改造、节能咨询服务、能源证书、市场投资等提高建筑能源效率；CO₂ 减排，2015 年 27.6 万吨，2025 年 42.1 万吨。非住宅建筑——CO₂ 减排，2015 年 43.3 万吨，2025 年 88.5 万吨。

2、法兰克福建筑的节能低碳特色

(1) 被动式建筑

被动式建筑 (Passive House) 的概念和技术起源于法兰克福，是德国在上世纪 80 年代低能耗建筑的基础上提出的一种节能建筑类型。法兰克福是德国乃至全球被动式建筑的领军，并且当前依然是欧洲被动式建筑的最高纪录保持者，全市共有 1000 座被动式建筑，主要为公共建筑，包括学校、医院、办公楼等，面积达到 10 万平方米 (2010 年)。

所谓“被动”是相对于普通建筑主动耗能而言。常规建筑在运行过程中都在“主动”地消耗各种能源——电能和热能等，而被动式建筑是指在几乎不利用人工能源的基础上，依然能够使室内能源供应达到人类正常生活需要。

被动式建筑通过建筑本身的构造做法达到高效的保温隔热性能，采用高效热回收通风系统，其用电、制冷和采暖最大程度地避免使用化石能源，而依靠自然能源 (太阳能、风能、地源热能等) 和建筑自身产生的能量，满足室内气候环境要求。

被动式建筑标准比 LEED 标准 (绿色建筑认证) 更加严格，需要综合考虑房屋的节能效率，室内气候舒适度，建筑的经济性和环保性，采用德国被动式建筑能耗计算工具 (Passive House Planning Package, PHPP) 计算其能耗。达到被动式建筑的主要标准为：一次能源需求不高于 120 kWh/(m²·a)；采暖供热总量不高于 15 kWh/(m²·a)；制

冷能耗不高于 $15\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ；房屋气密度： $n_{50}=0.6/\text{h}$ ，即在室内外空气压力相差50帕情况下，门窗全部关闭，每小时空气泄漏小于室内空气体积的0.6倍。

目前全世界大约有15000座被动式住宅，其中德国有4000~6000座。根据德国的建筑节能要求，新建住宅采暖能耗应控制在 $90\text{kWh}/\text{m}^2$ 以下，而被动式住宅能耗仅为规定的15~20%。

法兰克福市典型的被动式建筑案例是Sophienhof(建筑名)。Sophienhof经过改造，采暖能耗已经达到了 $15\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ，改造成本增量3~5%，回收时间为9~10年。Sophienhof具有宽阔的庭院和阳台，这样在冬季就有足够大的面积来接受阳光的辐射，储存热量，其他热量由3个带缓冲储存器的煤气燃烧锅炉提供。Sophienhof还采用了特殊材料制成的保温墙，将墙的导热系数控制在接近零值，达到了严格的节能标准。

法兰克福市政府的所有新建建筑都要求建成被动式建筑，此外，在从法兰克福市政府购买的土地上建设的建筑，也必须满足被动式建筑标准。这样，法兰克福市新建建筑中约有一半建筑需要达到被动式建筑的标准。在房地产投资市场活跃的法兰克福，被动式建筑非常受欢迎。

当前包括德国在内的许多欧洲国家已经开始大力提倡和推广被动式建筑。欧盟建筑能效指令（EPBD）要求欧盟国家到2020年所有新建建筑都必须达到零能耗。因而被动式建筑前景广阔。

(2) 建筑能源证书管理制度

德国2002年出台了建筑能源节约条例（EnEV），在全球首次提出建筑能源证书（Energiepass）的概念，在德国境内强制执行，要求所有新建建筑、翻修建筑或者建筑更换所有人时，必

须出示达标能源证书。2006年修订出台EnEV2006，包括了共建部分。能源证书制度使得不同地区的建筑物能源具有可比性，并且可用较为精准的数值进行评价，实践意义很强。

法兰克福市2007年开始积极开展能源证书管理制度（Energieausweis），是全德国能源证书制度实施较为彻底和较为成功的城市之一。能源证书管理制度有效刺激了新建建筑节能水准的提高和已有建筑的节能改造。以其房屋管理局的建筑为例，能源证书中明确标出了建筑各类能耗和成本，非常清楚，有利于建筑节能改造的实施和成本效益分析，对于私人建筑也有利于其进行市场化交易。

法兰克福的建筑特征与中国的对比及借鉴

1、中国城市建筑和法兰克福市建筑能耗差异大

法兰克福市同我国黑龙江省黑河市同处一个纬度，但两个城市的气候条件差异极大。由于法兰克福市独特的地理环境，使其温度一年四季非常适宜，冬

季并不需要太多采暖，夏季的制冷需求也并不大，这也是法兰克福市能发展被动式建筑的关键原因。可以说，在中国北方采暖区很难找到一个与法兰克福市气候条件相似的城市。表1显示了我国建筑的能耗和碳排放特征。可以看出，我国建筑单位面积能耗水平都不低，尤其是采暖能耗较高，而且占据了建筑能耗的大部分。

通过我国建筑能耗和发达国家尤其是德国的对比（图1），可以看出，我国平均建筑能耗水平偏低，尤其是人均建筑能耗，而单位面积建筑能耗也属于较低水平，这主要是因为我国民用建筑用电消费水平低，主要能耗都发生在冬季采暖，并且不同城市之间采暖差异很大。德国2005年的建筑平均能耗水平是 $226\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ， CO_2 排放水平为 $58\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ，高于我国水平，但当比较采暖能耗时，我国就明显高于德国水平了。德国整体建筑采暖能耗在 $40\sim 130\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ，并且其建筑节能标准非常严格，而我国北方建筑采暖能耗明显高于这一水平。

表1 中国建筑能源消耗和 CO_2 排放（2006年）

采暖情况	气候分区	总面积 (亿 m^2)	总商品 能耗 (万吨ce)	CO_2 排放 (万吨)	平均能耗 $\text{kgce}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$	平均能耗 $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$	平均 CO_2 排 放 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$
采暖	北方城镇采暖	75	14280	42748	19	196	57
	夏热冬冷地区城镇采暖	70	1280	3296	2	21	5
	北方农村采暖	80	6640	19920	8	40	25
	夏热冬冷地区农村采暖	107	420	1260	0.4	2	1
除采暖外	城镇住宅	113	9980	24905	9	22	22
	农村住宅	221	12790	36155	6	15	16
	一般公共建筑	58	10950	26696	18	44	44
	大型公共建筑	3					
合计		395	56350	154980	14	145	39

【注：ce为标准煤；主要数据来自清华大学建筑节能研究中心，平均数据及换算和 CO_2 排放为环境保护部环境规划院计算；由于德国的建筑能耗采用 $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ，而我国采用标准煤耗，所以将标准煤耗换算为 kWh ，表中城镇供暖热效率按照小型热电联产计算（好处归热法，采暖热效率取127%），其它地区采用60%的热效率；发电效率取30%。】

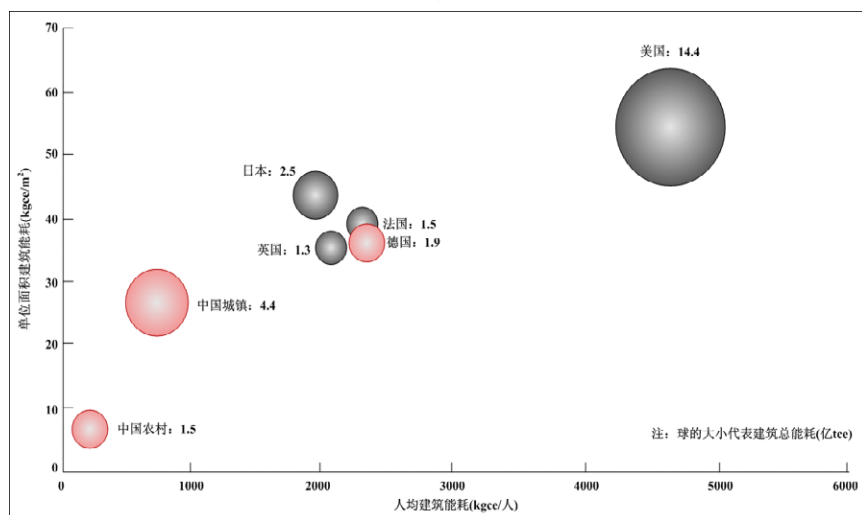


图1 中国和德国及世界主要国家建筑能耗比较 (2008年)

(资料来源:清华大学建筑节能研究中心, 2012, 略有修改)

尤其对于公共建筑,德国实施了比民用建筑更加严格的节能标准,法兰克福市要求所有新建公共建筑都必须是被动式建筑,这就进一步提高了节能标准。而我国城市公共建筑电耗过高,法兰克福市的公共建筑能耗基本在 $150 \sim 180 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 左右,我国则达到了 $250 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的水平。

从建筑节能标准上看,我国城市和德国法兰克福也存在很大差异。即使当前国内部分城市(北京、天津、上海、重庆等)采取了积极的建筑节能标准,其采暖能耗也高于法兰克福市的采暖标准水平,并且离被动式建筑差距很大。

2、借鉴意义

(1) 被动式建筑在我国近期并不现实

法兰克福之所以存在大量被动式建筑,除了其严格的建筑节能标准和技术创新,更重要的是其独特的气候特征。由于被动式建筑对采暖能耗要求非常严格,而我国建筑采暖又普遍偏高,此外,中国城市存在大量高层住宅,推广被动式建筑存在技术上的难点(法兰克福被动式建筑多为中低建筑)。

我国建筑能耗当前的主要问题是供暖制度,由于我国建筑热计量的缺陷(按供暖面积收费),绝大多数城镇地区都存在过量供暖问题,成为影响我国建筑能耗的关键问题,也是我国供暖制度改革的重点,只有合理的供暖制度和收费制度,才能推动建筑所有者和使用者积极采取节能措施。

当然,被动式建筑的许多重要理念仍然对我国有借鉴意义,例如增强建筑隔热性能等,可以在中国地方法规或条例中提出对建筑隔热的更高要求,从而降低采暖热耗;要求增加外墙屋面围护结构保温隔热层厚度,增加外窗的气密性和绝热性,严格控制窗墙比等。此外,我国公共建筑能耗水平普遍高于居民建筑,这与法兰克福市形成鲜明对比,法兰克福市的公共建筑属于市政府管辖权内,所以对公共建筑有非常严格的能效要求,而这一点对于我国城市有很大启发意义。

(2) 建筑能源证书对我国有非常积极的借鉴意义

从法兰克福市能源证书管理制度的实施来看,其对建筑节能起到了非常重

要的推动作用,更重要的是,其充分利用了市场力量来促进建筑能效的提高。

2010年,我国建筑总能耗达到6.77亿吨标准煤,达到全国总能耗的20.9%,单位建筑能耗为 $14.5 \text{ kgce}/\text{m}^2$,建筑能耗在我国能源总消耗中占据非常重要的地位,并且随着建筑面积的上升和生活水平的提高,建筑能耗依然会呈上升趋势。而建筑节能的基础正是较为准确、清晰的建筑能源核算。

中国政府出台了诸如《民用建筑节能设计标准(采暖居住建筑部分)》等建筑节能标准,发挥了重要的作用,但基本都是针对建筑设计阶段,并且缺乏完整的体系。这些标准对于建筑能耗计算方法、建筑最小能耗要求、建筑能效标识等都没有明确的规定和要求。

与此同时,中国当前不同地区、不同建筑的能源消费量可比性很差,例如不同的供热条件、不同的围护结构、不同建筑体型系数和不同窗地比等建筑之间的能效比较非常困难。一个综合的建筑能耗计算方法是评价建筑能效的基础,也是建筑最小能耗要求等其他建筑节能措施的基础。德国的能源证书把建筑能耗比较彻底地量化,并且提供了较为精细和全面的计算方法,有利于房屋的市场化交易,并且有利于不断提高房屋的能效水平。

因此,我国需要积极借鉴法兰克福在这方面的成功经验,首先在一些重点一线城市开始尝试建立建筑能源证书制度,评价不同建筑的能源消耗情况,并提出具体节能措施,这将对我国城市建筑节能、居民建筑节能意识的提高具有非常重要的作用,此外还能刺激房地产行业将建筑能源证书作为其房屋评估的重要内容,从而将市场力量引入建筑节能领域。■

作者单位:环境保护部环境规划院