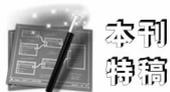


城市节能的关键性能指标

同济大学 龙惟定[☆] 范蕊

住房和城乡建设部科技发展促进中心 梁浩

同济大学 刘魁星



摘要 根据中国城市能耗特点,提出将城市能耗分为生产性能耗和消费性能耗两大类型。指出生产性能耗主要用效率指标来评价;消费性能耗应尽量用实物量指标来评价,也就是用量化的强度性指标 EUI(energy use intensity)评价,实现评价指标的可测量、可核查、可报告。即使采用相对性指标(如百分比指标),也一定要有明确的基准线。提出了城市生产性能耗、消费性能耗以及城市能源系统的关键性能指标。

关键词 城市节能 关键性能指标 生产性能耗 消费性能耗 城市能源系统

Key performance indicators for urban energy efficiency

By Long Weiding[★], Fan Rui, Liang Hao and Liu Kuixing

Abstract Based on the characteristics of urban energy consumption in China, proposes that the urban energy consumption be divided into two types—productive energy consumption and consumptive energy consumption. The productive energy consumption can be evaluated by efficiency indicators; and the consumptive energy consumption should be evaluated as much as possible by physical quantity indicators, i. e. by the intensity indicator EUI (energy use intensity). The evaluating indicators should be measurable, verifiable and reportable. Relative indexes (such as the percentage indicators) must have a clear baseline. Presents the key performance indicators of urban productive and consumptive energy consumption, as well as of urban energy systems.

Keywords urban energy efficiency, key performance indicator (KPI), productive energy consumption, consumptive energy consumption, urban energy system

★ Tongji University, Shanghai, China

①

1 城市能源利用的特点

城市能源利用分成三大领域和两大类型。三大领域分别是产业、交通、建筑;两大类型是生产性能耗和消费性能耗。城市节能与建筑节能的最大区别就是要实现产业、交通和建筑三大领域的全方位节能。而对城市节能的评价,则应针对生产性能耗和消费性能耗两大类型的不同特点进行。

对于以绿色低碳生态为目标的城区,其能源规划更需要设定非常明确的评价指标,即关键性能指标(KPI)作为开发的依据和必须实现的目标,也是各利益相关方共同接受和遵守的开发准则。

城市节能评价指标的设定要遵循 SMART 原则,即:

Special,评价指标既要符合所在城市当时当地的特定情况,也要符合城区开发的功能定位和战略

目标,更要符合城区内各种不同类型建筑的特点。

Measureable, KPI 评价指标要量化,并有适当的计算方法。既有绝对节能量,也有相对节能量。绝对量评价指标必须是“可测量、可核查、可报告”的数值,而相对量评价指标必须有明确的比较基准和参考值。

Achievable, KPI 评价指标是可实现的,符合城区开发的力度、进度和投资规模。对各项特定技术,特别要注意其经济性和投资回报,既要反对只顾经济效益而忽视节能的倾向,也要反对不计成本追求节能形象工程的倾向。

①[☆] 龙惟定,男,1946年11月生,硕士研究生,教授,博士生导师
200092 上海市四平路1239号同济大学中德工程学院
(021) 65986960
E-mail: weidinglong163@163.com
收稿日期:2012-10-10

Relevant, KPI 评价指标应与城市总体规划、生态规划以及其他专项规划相协调,也要与国内外各种能源、建筑、环境评价指标和技术标准相协调。

Timely,要注重 KPI 评价指标的先进性和时效性。城区开发需要较长的时间周期,要预计到若干年后技术标准的升级、技术水平的进步、技术能力的提升。

城市的能源消费是直接能耗,而城市的土地利用则产生间接能耗。城市能耗可分成生产性能耗和消费性能耗,应分别对应有不同的评价体系。

城市的所有社会产出都需要有劳动力和资本的投入。能源就是作为一种自然资本的投入,从而有产品和服务的产出,并创造价值。因此,生产性能耗简而言之就是直接创造价值的能耗。在城市中,产业、国际城际交通、物流、工业建筑、商用建筑、非公益性公共建筑的能耗,即制造业和服务业的能耗,都会直接创造价值,因此都属于生产性能耗,可以用效率性指标如单位 GDP 能耗和单位 GDP 碳排放来评价。针对生产性能耗,主要通过产业结构调整、提高产品附加值、采用先进工艺和规模化生产、提高劳动生产率等途径实现节能减排。

消费性能耗,包括所有公益性建筑(如学校、医院)、行政办公建筑、居住建筑的建筑能耗,公务车、城市公交和私家车的能耗。人们通过消耗能源,满足生产过程之外的生活功能,间接创造价值。在城市中,消费性能耗又被称为城市生活能耗(urban life energy),要用强度性指标如单位面积能耗(排放)和人均能耗(排放)来评价。对于用财政支出支付能源费用的公益性和行政建筑以及公务车消费,应加以限制。而对于居民日常生活衣食住行的能耗,例如住宅和私家车能耗,应加以引导,本着“以人为本”的宗旨,解决能源消费中的民生问题。

中国城市能源消费的特点是:

1) 几乎所有城市都以传统制造业的生产性能耗为主。中国尚处于工业化中期,传统制造业还是各城市的支柱产业,现代服务业的发展相对滞后,尤其是咨询、金融、传媒等高端服务业才刚起步,还没有形成规模。现代服务业的能耗体现在城市建筑能耗和交通能耗之中。尽管有些大都市(如京、沪)的第三产业产值比重已经超过第二产业,但由于我国工业结构是以投资拉动型的重化工业为主

导产业,致使工业能耗居高不下,能源利用效率低,所以制造业能耗总量高于服务业。图 1 给出了一些城市的人均碳排放量及其构成。

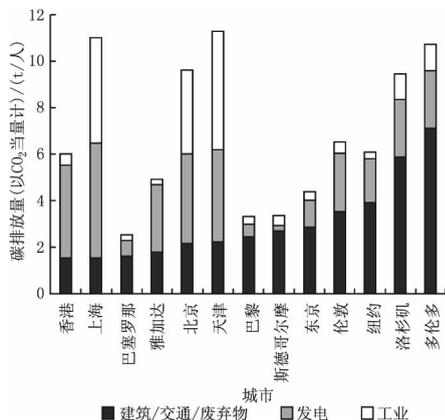


图 1 城市人均碳排放量及其构成^①

2) 城市能源结构具有以燃煤为主的高碳特征,带来各城市的高污染和高碳排放。

3) 生活水平的提高和生活节奏的加快,使得近 10 年来,中国城镇家用汽车拥有量以每年 40% 的速度激增,2011 年底,城镇居民家庭平均每百户拥有家用汽车 18.6 辆。而以汽车为主导的规划理念(COD),使得我国城市家用汽车的使用频率也比较高,平均每辆车每天所消耗的油大概是发达国家的 2 倍以上。我国平均每辆车全年消耗汽油或柴油 2.15 t,而在德国和日本都不超过 1 t^[1]。由于汽车使用频率高,造成各城市的交通严重拥堵,车辆长时间处于怠速和停车不熄火状态,进一步加大油耗和污染物排放。城市交通拥堵日益加重,交通能耗成为增长最快的能耗种类。

4) 制造业的全球化分工和集约化生产提高了资源配置效率,很多消费类电子产品的组装放在中国,最后再配送到世界各地销售。与传统“一站式”生产相比,生产性能耗中的工艺能耗转移为物流交通能耗。

5) 建筑能耗总体水平不高。城市居住建筑单位面积能耗的平均值只有同纬度发达国家能耗的几分之一。但因为我国城市建筑规模巨大,尤其是居住建筑存在大量空置房以及一户多房现象,每户家庭的实际用量与平均值有很大差别。调查显示,中国 660 个城市有高达 6 540 万套住宅连续 6 个

① World Bank. Sustainable low-carbon city development in China, 2012

电表读数为零,这表示全国有高达 6 540 万套空置房^[2]。所以在我国城市建筑中有三个“并存”,即低能耗和低环境品质并存、能源浪费和能源贫困并存、大处浪费和小处节约并存。

6) 巨大的消费性能耗潜在需求。消费性能耗不直接创造价值,根据能源费用开支的不同又分为两类:一类是行政办公建筑和公务车能耗,是用财政经费即纳税人的钱支付能源费用,这类能耗应该限制。目前比较容易控制的是政府办公建筑能耗,比较难控制的是公务车的使用。另一类是居住建筑和日常交通出行能耗,即人们衣食住行等城市生活能耗。它在本质上是民生的一部分。洗衣、烹饪和居住(衣食住)能耗都体现在住宅能耗中,可以计量;而日常交通(行)能耗,则与城市规模、经济发展、通勤距离、城市公交、路网设置等诸多因素有关,遵从统计规律。这类能耗应加以引导,鼓励但不应强求行为节能。在很多情况下,对待涉及民生的城市生活能耗,节能并不是唯一的。城市生活能耗的增长是刚性的,在中国呈线性上升的趋势;但只要不误导消费,这种增长的趋势会趋缓,逐渐变成指数型增长。

2 生产性能耗的节能评价

在中国多数城市中,产业能耗在总能耗中的比重最大,因此,生产性能耗的降低对城市节能有举足轻重的作用。生产性能耗应该用效率指标来评价。

1) 单位产值能耗

2011年,北京市的万元 GDP 能耗为 0.458 5 t 标准煤,降幅为全国最大。产业结构主动调整,首钢的涉钢业务 2010 年底全部退出,是北京 2011 年能耗水平大幅下降的首要原因^[3]。可见,降低城市能耗,最主要的措施就是调整产业结构。

对于新建城区而言,对区域内的产业结构必须有明确的定位。中国不可能所有城区都是“服务业集聚区”“国际金融区”或“总部经济区”;中国也不可能像发达国家那样将传统制造业统统转移到欠发达国家;各城区不可能都像北京、上海那样,将钢铁企业的生产线转移到曹妃甸和湛江。新建城区可以根据各地发布的产业能效指南来设定主要产业的能耗入门标准。如上海市颁布的《产业能效指南(2011 版)》就规定了 200 多个产品(工序)的能耗限额值和准入值,涉及 169 个行业和 44 个能源品种。

以传统制造业为主的城区(工业区),可以根据能效指南中的产业产值能耗限额以及规划中该产业产值份额,加权计算出城区的 GDP 能耗指标。

但是,目前的能效指南还仅限于传统制造业,对于新兴产业和现代服务业,因为发展迅速,尚难以给出相应能耗指标。例如,我国软件业人均年产值仅为 1.4 万美元,韩国软件业则达到 11.7 万美元,而美国的谷歌(Google)公司为 119 万美元,苹果(Apple)公司更高达 139 万美元。根据国家发改委统计,2009 年我国高新区的人均生产总值达到 78 万元人民币,但也有一些地处开发区的高新技术企业,人均产值还不到 10 万元。作为智力密集型的服务业——设计行业,有的人均产值达 400 万元,有的只有十几万元。除了大型数据中心,新兴服务业中的能耗其实都差不多,因此,如何确定现代服务业和战略性新兴产业(包括节能环保、新兴信息技术、生物、高端装备制造、新能源、新能源汽车、新材料等七大产业)的单位 GDP 能耗,是亟需研究的重要课题;而如何提高人均产值、引进高附加值低能耗产业,是新建城区的重要任务。

在没有详尽资料数据时,可以参照国内比较先进地区的产值能耗指标。图 2 给出了一些城区每万元 GDP 的能耗指标。

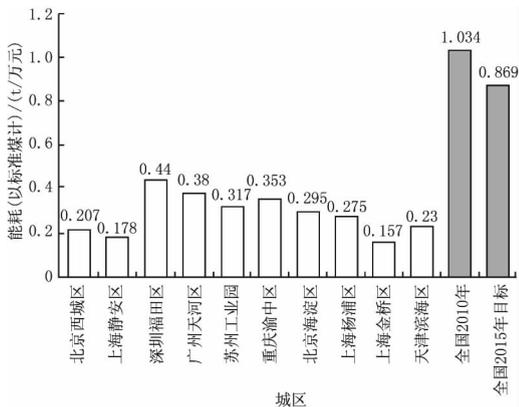


图 2 全国主要城区的万元 GDP 能耗

北京西城区、上海静安区都是现代服务业集聚的城区,第三产业产值都达到 90% 以上。而深圳福田区、广州天河区、重庆渝中区等城区,第三产业产值也都在 70% 左右。其他几个城区都是现代服务业和先进制造业混合的城区。产值能耗指标可以结合当地情况,参照这些城区确定。

有了万元 GDP 能耗指标,便可以计算出万元 GDP 碳排放量,只要将能耗值乘以碳排放系数即

可。但要注意的是,所用碳排放系数,应考虑当地能源结构,根据下文中能源系统的碳足迹确定。

2) 单位产值水耗

单位 GDP 用水量是指地区总用水量与国内生产总值(GDP)之比,以 $\text{m}^3/\text{万元}$ 为单位表示。我国生态城市达标值为 $\leq 150 \text{ m}^3/\text{万元}$;2020 年全国目标为 $125 \text{ m}^3/\text{万元}$;2020 年上海市目标为 $52 \text{ m}^3/\text{万元}$;2010 年北京市已达 $29.4 \text{ m}^3/\text{万元}$ 。以服务业为主的城区,可参照北京市 2010 年的水平。

3) 地均能耗

表 1 几个城区的地均产值指标

	土地面积/ km^2	地均产值/(亿元/ km^2)	地均能耗(以标准煤计)/(t/km^2)	年份
北京中关村科技园区	131.84(建成区)	23.2		2011
上海陆家嘴金融贸易区	6.8(规划区)	237		2011
上海漕河泾新兴技术开发区	14.28	82.5	16 500	2011
上海静安区	7.62	22.8	42 636	2010
上海金桥出口加工区	27.38	76.6	120 262	2010
天津滨海新区	304.44(建成区)	16.52	34 692	2010
苏州工业园区	60(建成区)	26.5	84 005	2011

从表 1 可以看出,各种区域地均产值差别很大,在单位产值能耗相差不大的情况下,会导致产值越高,地均能耗越高。以此作为评价指标显然不合理。因此,提出单位面积能耗弹性系数概念。设所处城市当年单位土地面积能耗(以标准煤计)为 $E(\text{t}/\text{km}^2)$,单位土地面积产值为 $P(\text{亿元}/\text{km}^2)$;城区的单位土地面积能耗(以标准煤计)为 $E_c(\text{t}/\text{km}^2)$,单位土地面积产值为 $P_c(\text{亿元}/\text{km}^2)$,则地均能耗弹性系数 CE 为

$$CE = \frac{E_c}{\frac{E}{P_c}} \quad (1)$$

以上海静安区为例, $E_c = 42\ 636 \text{ t}/\text{km}^2$, $P_c = 22.8 \text{ 亿元}/\text{km}^2$;而 2011 年上海市的 $E = 18\ 710 \text{ t}/\text{km}^2$, $P = 3 \text{ 亿元}/\text{km}^2$ 。则由式(1)可以得出 $CE = 0.3$ 。

如果 $E_c \geq E$,而 $P_c \leq P$,则 $CE > 1$ 。所以地均能耗弹性系数应小于 1,且越小越好。

3 消费性能耗的节能评价

消费性能耗应尽量用实物量来评价,也就是用量化的强度性指标来评价,实现评价指标的可测量、可核查、可报告。即使采用相对性指标(如百分比指标),也一定要有明确的基准线。有些人习惯使用的描述性语言(如“明显降低”“大幅度增长”

地均产值,即地均 GDP,是每 km^2 土地创造的 GDP,是衡量土地利用效率的重要指标,反映城区中产业密集程度和集约化水平。有了地均产值,乘以单位 GDP 能耗,便可得到地均能耗指标。

地均产值指标与土地用途、建筑容积率、产业结构及园区的成熟度有很大关系。上海市制订的《产业用地指南》对上百个行业的建筑容积率、土地产出率作了规定。表 1 给出了几个城区的地均产值指标。

等)和没有明确比较对象的相对性指标(如“降低若干个百分点”)都不能成为关键性能指标。

1) 公共建筑单位面积能源消耗低于当地的能耗定额

各地都在研究制订公共建筑的能耗定额。因为经过前几年的建设,主要城市都建立了大型公共建筑能耗监测系统,开展过各类公共建筑的能源审计,收集了海量的公共建筑运行能耗数据,因此,完全可以通过统计分析和数据处理,得到基于实际情况的公共建筑能耗定额值。目前以上海市和北京市的能耗定额(建筑用能指南)覆盖的建筑类型最全,上海市的指南按“合理值”和“先进值”分别规定了入门的最低标准和较为节能的标准(见表 2)^[4]。因此,公共建筑的实际能源消耗应低于当地各相应功能建筑的能效先进值。

在国务院节能减排“十二五”规划^[5]中,对公共机构的建筑能耗给出了节能目标,见表 3。

河北省的公共机构能耗限额中还对公务车能耗作了规定^[6]。

2) 人均日常生活能耗指标

瑞士联邦政府曾设定节能目标为,2020 年包括衣食住行在内的人均能源负荷为 2 kW ,称为“ 2 kW 行动”,即一个瑞士居民一天的能耗为 $48 \text{ kW} \cdot \text{h}$,折算为标准煤相当于 $6 \text{ kg}/\text{d}$ 。

表2 公共建筑能耗定额的先进值(上海市)

公共建筑类型	单位建筑面积综合能耗(以标准煤计)/(kg/(m ² ·a))	
医院	≤60	
酒店	五星级	≤55
	四星级	≤48
	一~三星级	≤41
商业建筑	百货店及购物中心	≤65
	超市及仓储店	≤75
	家电专业店	≤35
	餐饮店	≤150
	浴场	≤110
高校	≤15(或每个学生平均350 kg/(人·a))	
党政机关办公建筑	建筑面积≤2万m ² ,用分体空调	≤32
	建筑面积≤2万m ² ,用集中空调	≤34
	建筑面积>2万m ² ,用分体空调	≤36
	建筑面积>2万m ² ,用集中空调	≤38

表3 国务院节能减排“十二五”规划公共机构节能目标

	2010年	2015年
公共机构单位建筑面积能耗(以标准煤计)/(kg/m ²)	23.9	21
公共机构人均能耗(以标准煤计)/(kg/人)	447.4	380

2009年,上海市的人均生活能耗(以标准煤计)为500 kg/a,从2005至2009年的5年中,年均增速为8%。设到2020年的10年间年均增速为6%,可估算出人均生活能耗将达到900 kg/a,约合2.5 kg/d,是瑞士人均日能耗的40%。

这些能耗可以达到什么样的生活水平呢?大致如下:

人均居住建筑面积35 m²(基本达到小康国家生活目标——人均37 m²),居住建筑单位面积能耗(以标准煤计)22 kg/(m²·a)(比现在上海市平均水平多了8 kg/(m²·a)),即人均居住建筑能耗770 kg/a,合2.1 kg/d。

如果人均日出行距离为10 km,出行方式如表4所示,可得出人均日生活能耗(包括衣食住行,以标准煤计)为2.4 kg/d,可以维持较好的生活水平。注意严寒和寒冷地区有集中供暖的住宅,还要加上20 kg/(m²·a)(全国平均)的供暖能耗(以标准煤计)。但应相应减少其他住宅能耗(空调能耗)。

表4 出行方式及能耗(2020年)

	人千米能耗(以标准煤计)/kg	使用人数比例/%	人均日能耗(以标准煤计)/(kg/d)
私人汽车	0.095 03	20	0.19
公共汽车	0.024 3	20	0.049
地铁	0.011	30	0.033
电动自行车	0.004 6	10	0.004 6
自行车	0.002 2	15	0.003 3
步行	0.011 2	5	0.005 6
合计		100	0.285

人均日生活能耗要根据所在地区的气候、经济水平、人均住宅面积等具体情况确定。

3) 建筑使用过程中的人均碳排放指标

在评价建筑碳排放时,要用建筑使用者人均碳排放的强度指标。这是因为,建筑的碳排放源有两个,即土地利用和能源利用。如果仅用建筑节能领域惯用的单位建筑面积强度指标,则有一定的局限性。占有10 m²建筑面积的人和占有100 m²建筑面积的人,后者占有的资源会是前者的数倍,但后者的单位建筑面积能耗(或碳排放)却很可能低于前者。

建筑使用过程中的人均碳排放指标用下式计算:

$$C = CA \times PA \times DDR \quad (2)$$

式中 C 为建筑使用过程中的人均碳排放指标(以CO₂当量计),kg/人; CA 为区域内平均单位建筑面积能耗产生的碳排放量(以CO₂当量计),kg/m²,由区域内建筑单位面积全年能耗量(以标准煤计) EA (kg/m²)转换得来,即 $CA = K \times EA$,其中 K 为每kg标准煤的碳排放系数; PA 为区域内建筑物使用者平均占有的建筑面积(可以用区域内总建筑面积除以区域内规划人口得出),m²/人; DDR 为当地的相对供暖供冷度日数, $DDR = DDR_h \times DDR_c$,其中 DDR_h, DDR_c 分别为相对供暖、供冷度日数。

相对供暖度日数:

$$DDR_h = \frac{HDD_L}{HDD_B} \quad (3)$$

式中 HDD_B 为北京市以18℃为基准的供暖度日数, $HDD_B = 2\ 699\ ^\circ\text{C} \cdot \text{d}$; HDD_L 为当地供暖度日数, $^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 。

相对供冷度日数:

$$DDR_c = \frac{CDD_L}{CDD_S} \quad (4)$$

式中 CDD_S 为上海市以26℃为基准的供冷度日数, $CDD_S = 164\ ^\circ\text{C} \cdot \text{d}$; CDD_L 为当地供冷度日数, $^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 。

以浙江省宁波市为例,其 $CDD_{26} = 235\ ^\circ\text{C} \cdot \text{d}$, $HDD_{18} = 1\ 429\ ^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 。如果居住建筑单位面积年能耗(以标准煤计)以18 kg/m²为目标,人均居住面积为35 m²,浙江省平均碳排放系数(CO₂当量/标准煤)为2.53 kg/kg,则可以得到宁波市居住建

筑使用过程中人均碳排放指标(以 CO_2 当量计)为 $1\ 211\ \text{kg}/\text{人}$ 。

4) 城市生活能源消费碳指数

如果将人均日生活能耗指标(以标准煤计)控制在 $2.5\ \text{kg}/\text{d}$,取国家发改委公布的标准煤的碳排放系数 $2.5\ \text{kg}/\text{kg}$,则确定每人每天城市生活能源消费性碳排放基准(以 CO_2 当量计)为 $6.25\ \text{kg}/\text{d}$ 。有两个途径计算能源消费碳指数:

第一个途径,通过节能使人均日城市生活能源消费(以标准煤计)低于 $2.5\ \text{kg}/\text{d}$,实际能耗值为 W_s ,则城市生活能源消费碳指数值为 $(W_s \times 2.5\ \text{kg}/\text{kg})/(6.25\ \text{kg}/\text{d})$ 。

举例,如果实际人均日城市生活能源消费(以标准煤计)为 $W_s=1.8\ \text{kg}/\text{d}$,则城市生活能源消费碳指数值为 0.72 。

第二个途径,通过应用可再生能源,改变能源结构,即改变碳排放系数,计算得出新的综合碳排放系数 C_x ,则城市生活能源消费碳指数值为 $(6.25\ \text{kg}/\text{d}-C_x)/(6.25\ \text{kg}/\text{d})$ 。

在利用太阳能的情况下,也可计算出太阳能提供的能量量,将这部分碳排放量扣除。

举例,某家庭采用太阳能热水器,平均每天提供 $100\ \text{L}$ 热水,假定热水从 $10\ ^\circ\text{C}$ 加热到 $45\ ^\circ\text{C}$,则太阳能提供热量为 $14.7\ \text{MJ}$ ($3\ 500\ \text{kcal}$),相当于 $0.5\ \text{kg}$ 标准煤。家庭人口按 2.5 人计算,平均每人使用的太阳能相当于 $0.2\ \text{kg}$ 标准煤,折合碳排放量(以 CO_2 当量计)为 $0.5\ \text{kg}/\text{d}$ 。则城市生活能源消费碳指数值为 0.92 。

5) 公交出行比例大于 60%

根据上海市最近的一次调查,市民使用公共交通工具出行的次数占出行总次数的 37.1% ,占使用交通工具出行总次数的 49.9% ,占使用机动车出行总次数的 68.5% ;通勤交通中,使用公共交通出行比例更高,占出行总次数的 47% ^[7]。上海市“十二五”规划提出的目标是公交出行率达到 50% 。

从表 4 可以看出,私人汽车的人千米能耗最高。显然,减少私家车使用,增加公共交通和自行车、步行等慢行交通是城市节能的重要方面。

我国多数城市公交车保有量为每万人 $5\sim 12$ 辆,而发达国家的公交车保有量则在每万人 17 辆以上;我国城市轨道交通刚开始大规模建设,北京、上海等超大型城市刚达到人均轨道交通里程数 2

cm 左右,而东京、纽约、伦敦等发达国家大城市人均都在 $7\sim 10\ \text{cm}$ 。公共交通在数量上的不足,导致其在舒适性、安全性、便利性等方面都无法与私家车相媲美,使越来越多的人宁可堵车,也要开车。

中国是自行车国家。与欧美国家将自行车作为休闲健身工具不同,中国人一直把自行车作为城市主要交通工具看待。但近年来随着城市化发展和以私人汽车为导向的规划思想,使得在城市里靠自行车和步行出行越来越不方便,自行车交通大幅度萎缩。世界银行的调研结果非常能说明问题(见图 3)。

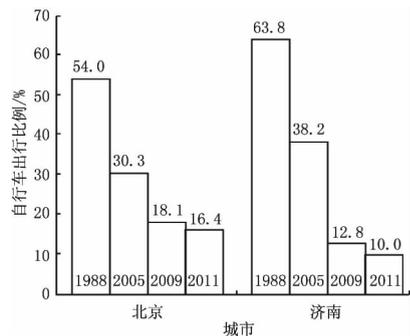


图 3 城市自行车交通的变化趋势^①

欧盟 27 国在 2009 年时每千人汽车拥有量为 473 辆,而 2010 年中国汽车保有量第一的北京市是每千人 229 辆。但欧洲主要城市都保持了很高的公共交通/自行车/步行出行率,见表 5。

对中国城市而言,应把公共交通/自行车/步行出行率达到 90% 以上作为目标。而公共交通出行率也应达到 60% 以上。

4 城市能源系统的节能评价

1) 最终能源消费中的碳足迹

这一指标用来测算区域或建筑能源系统的相对碳排放量。首先计算区域能源系统的碳排放总量:

$$G_t = E_c \delta_c + E_o \delta_o + E_n \delta_n + E_b \delta_b + E_r \delta_r + E_e \delta_e \quad (5)$$

式中 G_t 为区域能源系统的碳排放总量(以 CO_2 当量计), t ; E_c 为煤炭消耗量, t ; δ_c 为煤炭消耗的碳排放转换系数(以 CO_2 当量计), t/t ; E_o 为石油消耗量, t ; δ_o 为石油消耗的碳排放转换系数(以 CO_2 当量计), t/t ; E_n 为天然气消耗量, t ; δ_n 为天

① 世界银行网站. <http://www.shihang.org/zh/news/2012/08/14/cycling-and-walking>

表5 欧盟部分国家首都的公共交通/自行车/步行出行率^①

国家	首都	公交/自行车/步行出行率/%
奥地利	维也纳	68
比利时	布鲁塞尔	37
荷兰	阿姆斯特丹	62
捷克	布拉格	67
德国	柏林	54.8
丹麦	哥本哈根	68
爱沙尼亚	塔林	61
希腊	雅典	65.5
西班牙	马德里	54
芬兰	赫尔辛基	44.7
法国	巴黎	40.4
英国	伦敦	63
匈牙利	布达佩斯	69
爱尔兰	都柏林	33
意大利	罗马	44
立陶宛	维尔纽斯	69.4
拉脱维亚	里加	73.4
波兰	华沙	70
葡萄牙	里斯本	66
瑞典	斯德哥尔摩	93
斯洛文尼亚	卢布尔雅那	36.4
斯洛伐克	布拉迪斯拉发	73.9
罗马尼亚	布加勒斯特	76
保加利亚	索非亚	75.4

然气消耗的碳排放转换系数(以 CO₂ 当量计), t/t; E_b 为生物质能源消耗量, t; δ_b 为生物质能源消耗的碳排放转换系数(以 CO₂ 当量计), t/t; E_r 为其他可再生能源消耗量, t; δ_r 为可再生能源消耗的碳排放转换系数, 取 0; E_e 为电力消耗量, kW · h; δ_e 为电力消耗的碳排放转换系数(以 CO₂ 当量计), t/(kW · h)。

各种燃料的碳排放转换系数可采用 IPCC 的数据^[8]。国家电网中电力消耗的碳排放系数根据国家发改委《2011 中国区域电网基准线排放因子》取值^[9]。各类能源折算标准煤的系数根据国家标准 GB/T 2589—2008《综合能耗计算通则》取值。

将城区消耗的所有能源转换为标准煤。其中, 将太阳能热水所提供的热量按热力折算, 将太阳能光伏、风力以及生物质发电按电力折算。将所有能源折算的标准煤量加总得到区域总能耗 E_t (t, 以标准煤计)。

计算区域的最不利碳排放量 G_p:

$$G_p = E_t \times 2.5 \quad (6)$$

根据城区内实际碳排放量 G_i 和最不利碳排放

量 G_p 可以计算出城区能源系统的相对碳足迹系数 C_f: C_f = G_i / G_p。指标 C_f < 0.8, 相当于城区利用可再生能源比例达到 20% 以上。

2) 城区能源基础设施的碳减排效率

对于作为能源基础设施的供冷供热系统, 以普通电力驱动的空气源冷水机组 (COP = 2.6) 作为冷源的比较对象, 以燃煤供暖锅炉 (热效率 60%) 作为热源的比较对象。假定各种冷热源的末端系统的能源效率、输送系数相同, 由此得出的冷热源的碳排放量与比较对象相比所得到的减排量, 被称为“避免碳排放量 (avoided CO₂ emission)”。

因此, 建筑设备的碳排放评价是一个投入产出分析过程, 即投入“隐含碳”、间接碳和直接碳, 产出“避免碳排放量”的效率。定义评价建筑用能过程碳减排效率 ECM (efficiency of carbon mitigation):

$$ECM = 100 \times \frac{ACE}{EC + IC + DC} \quad (7)$$

式中 ECM 为碳减排效率, %; ACE 为避免碳排放量, kg; EC 为隐含碳排放量 (embedded carbon emission), kg; IC 为间接碳排放量 (indirect carbon emission), kg; DC 为直接碳排放 (direct carbon emission), kg。

间接碳排放量主要来自电力; 直接碳排放量主要来自现场产能 (如热电冷联供) 中燃料的直接燃烧; 而常用的可再生能源设备在寿命周期中都有隐含碳排放。表 6 和表 7 给出了常用建筑能源设备的碳减排效率。表 8 给出了光伏发电的碳减排效率, 按寿命周期 20 a 计算。

对于一般能源系统, 碳减排效率指标应大于 100%, 而对于低碳能源系统, 碳减排效率指标则应大于 200%。从表 6 和表 7 也可以看出, 地源热泵系统并无太大减排优势。

3) 可再生能源在最终能源消费中的比例

在城区范围要实现高比例的可再生能源利用, 目前还不太现实, 很大程度上还要依靠国家电网中水电、风电比例的增加来实现。可再生能源比例的计算应该以使用量而不是装机量作为基准。尤其不要夸大太阳能光伏和地源热泵的作用。计算方法如下。

① 西门子研究院. European Green City Index. <http://wenku.baidu.com/view/b9897b244b35eefdc8d3335f.html>

表 6 各种能源设备供热的碳排放比较

	一(二)次能源	一次能效/%	10 kW·h 供热排放 CO ₂ 量/kg	碳减排效率 ECM/%
燃煤锅炉	燃煤	60	5.34	0
燃气锅炉	天然气	90	2.10	154
电锅炉	电(全国平均发电水平)	33	9.00	-40
空气源电动热泵(COP=3.0)	电(全国平均发电水平)	105	2.87	86
	天然气发电 NGCC	171	1.10	385
	燃煤发电 IGCC	165	1.94	340
地源热泵(COP=4.0)	电(全国平均发电水平)	140	2.15	148
	天然气发电 NGCC	228	0.82	551
	燃煤发电 IGCC	220	1.45	268
燃气热泵(COP=3.5)	天然气	160	1.19	349
直燃机	天然气	90	2.10	154
热电联产+电力驱动热泵	天然气	162	1.17	356

表 7 各种能源设备供冷的碳排放比较

	一(二)次能源	一次能效/%	10 kW·h 供冷排放 CO ₂ 量/kg	碳减排效率 ECM/%
空气源电动制冷机(COP=2.6)	电力	91	3.31	0
地源热泵供冷(COP=4.5)	电力	157	2.22	49
水冷离心式制冷机(COP=6.0)	电力	210	1.46	127
燃气热泵(COP=3.5)	天然气	160	1.19	178
直燃机	天然气	130	1.46	127
热电联产(发动机)+电力驱动离心式 制冷机+单效吸收式制冷机	天然气	240	0.79	319

表 8 光伏发电的碳减排效率

单位发电量的隐含碳 排放量(以 CO ₂ 当量 计)/(kg/(kW·h))	光伏发电的 CO ₂ 减排量 (以 CO ₂ 当量计)/ (kg/(kW·h))	碳减排效率 ECM/%
0.287	0.573	200

① 国家电网中的可再生能源占 9%:根据国家可再生能源发展“十二五”规划,2015 年可再生能源在能源消费中的比例达到 9.5%以上,可再生能源发电量争取达到总发电量的 20%以上。因此,园区的供能中来自市政电网的可再生能源应用比例可以保证有 9%。

② 太阳能光伏的产能量:有两种简易计算方法。方法 1,园区光伏电池总装机容量(kW)×当地太阳能光伏当量满负荷时间(h)(例如,上海地区为 1 000 h),然后按当年火力发电标准煤耗折算为标准煤量。方法 2,全年总辐射量(MJ/m²)×光伏面积(m²)×10%(14%×70%),然后按 29.27 MJ 折合 1 kg 标准煤的换算关系折算成标准煤量。

③ 太阳能热水的产能量:太阳能热水器每 m²集热面积每年产能约合 125 kg 标准煤。

④ 风力发电的产能量:风力发电机的装机容量(kW)×当地风力发电可利用时间(h)(满负荷时间,无数据时可取 2 000 h),然后按当年火力发电标准煤耗折算为标准煤量。

⑤ 各种热泵应用中的可再生能源利用量:

$$HPRE = \frac{35COP - 100}{35COP} \times 100\% \quad (8)$$

式中 $HPRE$ 为热泵应用中的可再生能源比例; COP 为热泵的性能系数。

最后将所有可再生能源产能量除以总能源需求量,可得到园区可再生能源比例。

4) 各种终端能源消费与电力消费的比价

这一评价指标主要是针对在城区开发中为了达到某些绿色指标而不计成本的烧钱行为。定义各种终端能源消费与电力消费的比价 = $\frac{\text{终端能源消费单位当量热值的价格}}{\text{电力单位当量热值的价格}}$ 。

电力价格宜按当地峰谷电价的加权平均值计算。一般指标:终端能源消费与电力消费的比价 ≤ 0.8;低碳指标:终端能源消费与电力消费的比价 ≤ 0.33。

例如,假定某城区的冷热收费为 0.45 元/(kW·h),当地平均电力价格为 0.75 元/(kW·h),则终端能源消费与电力消费的比价为 0.6。而 0.33 的比价相当于使用 $COP=3$ 的热泵制热。

5 结语

本文从能耗本质上将能源消费分成生产性能

耗和消费性能耗。对生产性能耗,用单位 GDP 能耗(能耗效率)指标衡量;而消费性能耗不直接创造价值,用人均或单位面积实物量(即能耗强度)指标衡量。所有指标的设计都注重实物量节能,避免无基准的相对量评价,从而有利于能耗总量控制和能源规划的宏观调节。

限于篇幅,还有部分执行性指标(如“所有建筑按绿色建筑星级标准设计”等)没有列入本文。此外,还有一些与能源消费有关的指标,特别是行为节能方面的指标,本文也没有列入。

参考文献:

- [1] 凤凰网汽车. 熊传林:中国平均每辆车耗油量超发达国家两倍多[EB/OL]. (2011-09-03). <http://auto.ifeng.com/news/special/2011qichechanye/20110903/667811.shtml>
- [2] 百度百科. 住房空置率[EB/OL]. <http://baike.baidu.com/view/3318904.htm>
- [3] 新京报. 北京万元 GDP 能耗全国最低[EB/OL]. <http://news.sina.com.cn/o/2012-08-21/023925002881.shtml>
- [4] 徐强,庄智,张蓓红. 上海地区大型公共建筑用能定额

研究[J]. 上海节能,2011(12):17-20

- [5] 国务院办公厅. 国务院关于印发节能减排“十二五”规划的通知[EB/OL]. (2012-08-06). http://www.gov.cn/zwggk/2012-08/21/content_2207867.htm
- [6] 河北省节能监察监测中心. 公共机构能耗限额[EB/OL]. (2012-03). <http://www.hbjnjc.gov.cn/>
- [7] 东方网. 上海公交调查:乘公交平均时耗比 8 年前少 7.2 分钟[EB/OL]. (2012-07-20). <http://sh.eastday.com/m/20120720/u1a6718960.html>
- [8] 百度文库. IPCC2006 年碳排放系数[EB/OL]. <http://wenku.baidu.com/view/9f58c854ad02de80d4d84013.html>
- [9] 国家发改委应对气候变化司. 2011 中国区域电网基准线排放因子[EB/OL]. (2011-10-20). <http://cdm.ccchina.gov.cn/WebSite/CDM/UpFile/File2720.pdf>
- [10] 龙惟定,范蕊,梁浩. 城市节能[J]. 暖通空调,2012,42(2):1-8,29
- [11] 龙惟定,张改景,梁浩,等. 低碳建筑的评价指标初探[J]. 暖通空调,2010,40(3):6-11
- [12] 龙惟定,梁浩. 低碳生态城区能源规划的目标设定[J]. 城市发展研究,2011,18(12):13-19