

文章编号: 1673-1719 (2009) 04-0231-06



北京市1996—2007年住宅空调致冷耗能影响因素分析

陈莉¹, 李帅², 方修琦³, 陈坤⁴

- (1) 黑龙江省哈尔滨市气象局, 哈尔滨 150080;
 (2) 黑龙江省气象科学研究所, 哈尔滨 150030;
 (3) 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875;
 (4) 黑龙江省第一建筑工程公司, 哈尔滨 150060)

摘要: 采用气象资料和经济统计资料, 以北京市为例, 分析了城镇住宅空调致冷耗能的影响因素。结果显示: 在一定建筑设计标准下, 直接影响城镇住宅空调致冷耗能的因子主要有降温强度、城镇人口数、人均住宅建筑面积和城镇家庭空调器拥有比例。总的来说, 由于目前中国城市化进程的加速, 城镇人口、人均住宅建筑面积、城镇空调器拥有比例在不断增加, 因此, 无论气候变暖或变冷, 各地空调致冷耗能不可避免地增加。在上述因子中, 气候是目前为止唯一可能起到降低能耗作用的因子。对于城市化较快的北京市, 由于城镇家庭空调器拥有比例的快速增长, 城镇家庭空调器拥有比例这一因子对空调致冷耗能增量的贡献率普遍最大。

关键词: 城镇住宅; 空调致冷耗能; 影响因素; 贡献率; 城市化; 气候变化

中图分类号: P467/X24 **文献标识码:** A

引言

在全球变暖^[1-2]、节能减排的时代背景下, 气候变化对占社会总耗能比例近20%^[3]的建筑耗能的影响研究已经取得了一定成果^[4-6]。研究大多是对代表采暖/降温强度的采暖/降温度日数进行分析, 但采暖/降温强度只是单纯从气候角度反映了采暖/降温需求, 实质上采暖/降温耗能不仅与气候要素有关, 同时与其他社会经济因素也密切相关。如: 空调致冷耗能不仅与降温强度有关, 而且直接受有无空调器的影响。如何定量分析中国城镇空调致冷耗能各影响因素的贡献率, 是本文将要回答的问题。

1990年代中期以来, 随着我国经济水平的大幅度提高, 全国各地住宅降温设备由原来的电风扇普遍转为空调器。在全国范围内, 城镇家庭空调器拥

有比例增加最快的是北京, 且北京城市化速度也是最快的, 故本文以北京为例, 对1996—2007年期间影响该市城镇住宅空调致冷耗能变化的因素进行定量分析, 希望从气候与社会经济发展相结合的角度对北京空调致冷耗能变化有一个较为清晰的认识。

1 资料

1.1 气象资料

所用气象资料为北京市气象台站1971—2007年逐日气温资料, 来源于中国气象局。

1.2 社会经济统计资料

社会经济统计资料来源于北京统计年鉴2007^[7], 包括北京市1995—2007年历年城镇人口数、城市人均

收稿日期: 2008-09-18; 修订日期: 2008-10-29

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200706021); 黑龙江省气象局2008—2009年度一般性科研项目资助

作者简介: 陈莉(1972—), 女, 高级工程师, 从事气候变化影响研究。E-mail: climate_chenli@163.com

住宅建筑面积和城镇家庭每百户拥有空调器数量。

1.3 建筑物耗冷量指标和空调年耗电量指标

《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准JCJ134—2001》^[8]按夏热冬冷地区建筑传统的围护结构：240 mm砖墙、架空通风屋面、单层金属窗，在保证主要起居夏季26℃的条件下，用额定制冷工况能效比为2.2的空调器降温，计算现有典型建筑全年空调用电量，以此作为基础能耗，降低50%后作为节能建筑的能耗指标^[9]。也就是说，该标准能耗指标按节能50%的要求，确定了节能综合指标，包括建筑物耗冷量指标和空调全年用电量，见表1所示。在我国其他建筑热工分区（包括严寒和寒冷地区、夏热冬暖地区、温和地区）^[10]中对空调年用电量标准均未作规定。因此，把空调年耗电量指标推广到夏热冬暖地区、温和地区及严寒和寒冷地区，用空调拥有比例作为权重以衡量这些地区年空调致冷耗能的历年变化。同时居住建筑空气调节设施并非居住建筑的必须设施，它是由气候情况、经济条件等因素决定的。因此，本文在研究空调致冷耗能时，不进行人为干预，而是首先假设全部城镇拥有空调器，把空调器拥有比例作为权重系数，从而得出比较客观的空调致冷耗能。

2 方法

2.1 降温强度的计算方法

根据《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准JCJ134—2001》^[8]、《夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准》^[11]和《夏热冬冷地区建筑节能技术》^[9]的规定，夏季居住室内空调设计温度为26℃，同时这些文献在降温强度的计算中，均以26℃作为基础温

度。因此，本文把一年内日平均气温高于26℃的天数之和，称为降温日数。但要注意的是，本文与国家相关规范上规定的26℃只是一个设计计算温度，主要是用来分析降温气候条件，并不等于实际室温^[9]。某一年的降温强度定义^[12]如下：

$$c = \sum_{i=1}^{M_d} \theta_d (T_i - T_b) \quad (1)$$

式中： c 为某一年的降温强度； M_d 为某一年的天数； T_i 为日平均气温； T_b 为基础温度，即26℃； θ_d 为系数，如果日平均气温高于基础温度，则为1，否则为0。可以看出，降温强度大小反映了温度的高低，降温强度大，说明温度高，需要减少的热量较多，即降温需求较大。

2.2 城镇住宅降温耗能影响因素分析方法

理论上讲，城镇住宅空调致冷耗能量主要与气温因素（降温强度）、城镇人均住宅建筑面积、舒适度（主要指室温）、建筑物的热工特性（包括建筑物的围护结构、传热系数等）等有关。因此假设：1) 历年建筑物标准室温为26℃；2) 不同建筑物的热工特性相同。同时，可以认为单位度日数单位面积空调致冷耗电量是常量。则某城镇某一年住宅空调致冷耗电量为：

$$E = y \times p \times s \times \eta = c \times \lambda \times p \times s \times \eta \quad (2)$$

式中： E 为某年的住宅空调致冷耗电量（单位为kW·h）； y 为该年住宅单位面积空调致冷耗电量（单位为kW·h/m²）； c 代表气温因子，即降温强度； p 为该年人口数； s 为该年城镇人均住宅建筑面积； η 为空调器拥有比例，即城镇居民家庭每百户拥有空调器数量； λ 为单位度日数单位面积空调致冷耗电量，即表1中的单位面积空调年耗电量与相应的降温强度的

表1 建筑物节能综合指标的限值^[8]

Table 1 Standard energy consumption for energy saving of architecture^[8]

降温强度 /℃·d	25	50	75	100	125	150	175	200
耗冷量 / (W/m ²)	18.4	19.9	21.3	22.8	24.3	25.8	27.3	28.8
单位面积空调年耗电量 / (kW·h/m ²)	13.7	15.6	17.4	19.3	21.2	23.0	24.9	26.8

比值。

由式(2)可见, E 与降温强度、人口、人均住宅建筑面积和空调器拥有比例有关。降温强度越大, 人越多、人均住宅面积越大、空调数量越多, 则空调致冷耗电量越大。

2.2.1 影响因素分析方法

1990 年代以前, 全国各地致冷方式主要是采用电风扇, 而 1990 年代中期后空调器的使用越来越普及。因此本文把 1995 年人口、人均住宅建筑面积、空调器拥有比例作为社会经济资料的基准值, 把降温强度的 1971—2000 年的 30 a 均值作为气候基准值 (公式 3 中下脚标 0 代表基准值), 那么其后的某一年采暖耗电的变化量, 则由下式组成:

$$\begin{aligned} \Delta E &= E - E_0 = p \times s \times c \times \eta \times \lambda - p_0 \times s_0 \times c_0 \times \eta_0 \times \lambda \\ &= (p_0 + \Delta p) \times (s_0 + \Delta s) \times (c_0 + \Delta c) \times (\eta_0 + \Delta \eta) \times \\ &\quad \lambda - p_0 \times s_0 \times c_0 \times \eta_0 \times \lambda \\ &= \Delta \omega_1 + \Delta \omega_2 + \Delta \omega_3 + \dots + \Delta \omega_{15} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: ΔE 为某一年的空调致冷耗电量相对于空调致冷耗电基准值的变化量, E 为该年的空调致冷耗电量, E_0 为空调致冷耗电量基准值; p, s, η, c 分别为该年的城镇人口、人均建筑面积、空调器拥有比例及降温强度; p_0, s_0, η_0, c_0 分别为城镇人口、人均住宅建筑面积、空调器拥有比例以及降温强度的基准值。

公式(3)中某一年空调致冷耗电相对于基准值的变化量由 15 项组成, 各项的贡献率计算公式如下:

$$\gamma_j = \frac{\Delta \omega_j}{\Delta E} \times 100\%, \quad j = 1, 2, 3, \dots, 15 \quad (4)$$

式中 $\Delta \omega_j$ 和 γ_j 说明见表 2。

2.2.2 气温变化的总贡献率

由于历年气温发生变化的同时, 人口、人均住宅建筑面积和空调器拥有比例也在发生变化, 因此气温变化对空调致冷耗电增量的贡献应该包括与气温变化有关的所有组份的贡献, 即 $\gamma_c = \sum_{j=4}^{11} \gamma_j$ 。

表 2 空调整冷耗电变化量 15 个组成项 (贡献率) 的说明

Table 2 The definitions of $\Delta \omega_j$ and γ_j

组成项	说明
$\Delta \omega_1 (\gamma_1)$	单纯人口变化量所造成的空调致冷耗电变化量 (贡献率)
$\Delta \omega_2 (\gamma_2)$	单纯面积变化量所造成的空调致冷耗电变化量 (贡献率)
$\Delta \omega_3 (\gamma_3)$	单纯空调器拥有比例变化量所造成的空调致冷耗电变化量 (贡献率)
$\Delta \omega_4 (\gamma_4)$	单纯气温变化量所造成的空调致冷耗电变化量 (贡献率)
$\Delta \omega_5 (\gamma_5)$	气温变化量和人口变化量共同造成的空调致冷耗电变化量 (贡献率)
$\Delta \omega_6 (\gamma_6)$	气温变化量和面积变化量共同造成的空调致冷耗电变化量 (贡献率)
$\Delta \omega_7 (\gamma_7)$	气温变化量和空调器拥有比例变化量共同造成的空调致冷耗电变化量 (贡献率)
$\Delta \omega_8 (\gamma_8)$	气温变化量、面积变化量、空调器变化量所造成的空调致冷耗电变化量 (贡献率)
$\Delta \omega_9 (\gamma_9)$	气温变化量、人口变化量、面积变化量所造成的空调致冷耗电变化量 (贡献率)
$\Delta \omega_{10} (\gamma_{10})$	气温变化量、人口变化量、空调器变化量所造成的空调致冷耗电变化量 (贡献率)
$\Delta \omega_{11} (\gamma_{11})$	气温变化量、人口变化量、面积变化量、空调器拥有比例变化量共同造成的空调致冷耗电变化量 (贡献率)
$\Delta \omega_{12} (\gamma_{12})$	人口变化量和面积变化量共同造成的空调致冷耗电变化量 (贡献率)
$\Delta \omega_{13} (\gamma_{13})$	人口变化量和空调器拥有比例变化量共同造成的空调致冷耗电变化量 (贡献率)
$\Delta \omega_{14} (\gamma_{14})$	面积变化量和空调器拥有比例变化量共同造成的空调致冷耗电变化量 (贡献率)
$\Delta \omega_{15} (\gamma_{15})$	人口变化量、面积变化量和空调器拥有比例变化量共同造成的空调致冷耗电变化量 (贡献率)

注: 表中“面积”指人均住宅建筑面积

3 结果分析

3.1 空调致冷耗能影响因子的变化特征

图1显示了1995年以来城镇人口、人均住宅建筑面积、家庭空调器拥有比例、降温强度等4个因子的历年变化情况。

从图1可以看出,1995年以来北京市城镇人口和城市人均住宅建筑面积均呈增长趋势,线性增长速率分别为51.97万人/a和0.86 m²/a,城市家庭拥有空调器比例的线性增长速率为14.0%/a。北京市人口从1995年以来稳定增长,其中在2000年有一个较快的增长。城市人均住宅建筑面积近10 a来也呈现增长的趋势,从2003年开始增速有所放缓。城市家庭空调器拥有比例近10 a来基本维持线性增长,从1995年的11.8%上升至2007年的157.3%,2006年以后增速放缓,2007年较2006年仅增加0.2%。降温强度的线性变化趋势表现为增加,其线性增加速率为1.5 °C·d/a。

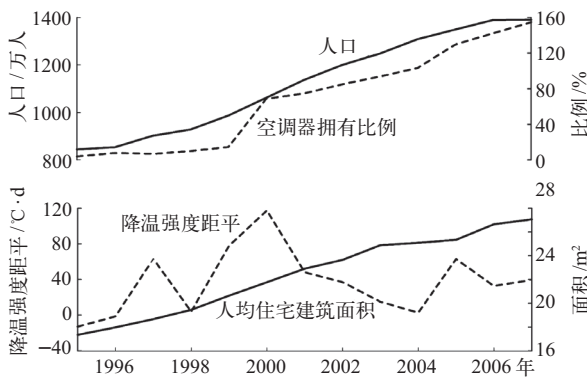


图1 影响北京城镇住宅空调致冷耗能的各因子历年变化
Fig. 1 The temporal variations of four influence factors of urban residential cooling energy consumption by air conditioners in Beijing since 1995

3.2 影响因子对降温耗能增量的贡献

以1995年城镇人口、人均住宅建筑面积、家庭空调器拥有比例为基准值,以1971—2000年总降温强度的30 a均值(59.1 °C·d)为气候基准值,图2给出了影响北京历年城镇住宅空调致冷耗能变化量的各个组成项的贡献率变化曲线。

3.2.1 总体特征

随着中国城市化进程的快速推进,人口、人均

住宅建筑面积、城镇家庭空调器拥有比例在不断增长,因此,无论气候变暖或变冷,北京住宅空调致冷耗能不可避免地增加。由于北京城镇人口、人均住宅建筑面积以及空调器拥有比例的不断上升,只有与气温变化有关的项对致冷耗能增加的贡献率可能出现负值,即对致冷耗能的增加起到抑制作用。但由于气候变暖,多数年份气温变化有关项对空调致冷耗能的增加起到了进一步加强的作用。

1995年以来,城镇家庭空调器拥有比例迅猛增长,这使得大多年份对北京城镇住宅空调致冷耗能增加贡献最大的就是单纯城镇家庭空调器拥有比例变化量的贡献(图2)。1996—2007年,当假定人口、人均建筑面积始终保持1995年水平,气候保持1971—2000年均值的状态时,空调器拥有比例的变化对北京城镇住宅空调致冷耗能的增量贡献率(γ_3)波动范围较大,从18% (1999年)到84% (1996年)。单纯面积变化量(其他3项保持不变)的贡献率(γ_2)以及单纯人口变化量(其他3项保持不变)的贡献率(γ_1)除了在1996年略高外,其他年份普遍在2%以下。

在8项与气温变化有关的组成部分中,对空调致冷耗能增量的贡献率最大的是气温变化量与家庭空调器拥有比例变化量的共同贡献,有的年份该贡献率(γ_7)超过了 γ_3 ,说明当气候变暖幅度较大时,即使空调器拥有比例增加不算太大,它们共同造成的空调致冷耗能增加量也是很大的。由于降温强度普遍较基准值(1971—2000年30 a均值)偏高,单纯气温变化量所造成的空调致冷耗能增量占空调致冷耗能总增量的份额(γ_4)一般为正值(1996年除外),除1997年和1999年外,其他年份 γ_4 均在10%以下,该项贡献率呈现出下降的趋势,其主要原因是人口、人均建筑面积、空调器拥有比例的增加速率较大。气温变化量、人口变化量与面积变化量合成的贡献率(γ_6)是这8项中最小的。

气温变化对空调致冷耗能的总贡献率(γ_c)代表了气候耗能占空调致冷耗能增量的百分比。从图上可以看出,由于气候显著变暖,它与单纯空调器变化量所造成的空调致冷耗能增加量相当,对北京空调致冷耗能的增加起到了举足轻重的作用。12 a中

γ_c 有 3 a 超过 60%，有 4 a 超过 40%。同时可以看到， γ_c 与 γ_3 呈反向变化。因为从公式 (4) 可以看出，15 个因子对空调致冷耗能增量的总贡献率应该为 100%，除了 γ_3 和 γ_c ($\sum_{j=1}^{11} \gamma_j$)，其余 6 个组份 (γ_1 、 γ_2 、 γ_{12} 、 γ_{13} 、 γ_{14} 和 γ_{15}) 对空调致冷耗能增量的贡献率较小，所以贡献率较大的 2 项——气温变化总贡献率与空调器拥有比例变化贡献率总体上必然呈反向变化。

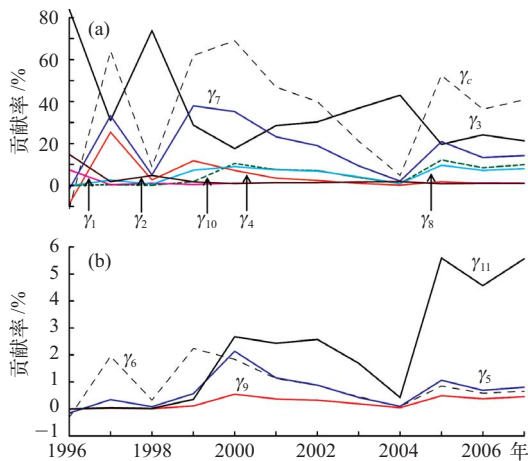


图2 北京城镇住宅空调致冷耗能各项贡献率 (γ_{12} 、 γ_{13} 、 γ_{14} 、 γ_{15} 均不足 0.5%，图上没有绘出)

Fig. 2 Contribution ratio of each item influencing urban residential cooling energy consumption in Beijing (curves of γ_{12} , γ_{13} , γ_{14} and γ_{15} are omitted since these items are all less than 0.5%)

3.2.2 高温年主要影响因子贡献率分析

在 1996—2007 年期间，1997、1999、2000 年气候偏暖最为明显，降温强度分别比 1971—2000 年 30 a 均值高 63.3、77.9 和 117.6 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 。1997 年空调致冷耗能相对于基准值增加了 11.4 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，其中单一因子变化贡献最大的是 $\Delta\omega_3$ (单纯空调器发生变化)，贡献率达 31%；位居第二位的是 $\Delta\omega_4$ (单纯气温发生变化)，贡献率达 25%；气温变化的总贡献率达 64%，其中只有空调器比例和气温两因子发生变化 ($\Delta\omega_7$) 的贡献率为 33%。1999 年空调致冷耗能相对于基准值增加了 30.4 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，其中单一因子变化贡献最大的仍然是 $\Delta\omega_3$ ，贡献率达 29%；位居第二位的也是 $\Delta\omega_4$ ，贡献率达 12%；气温变化的总贡献率达 62%，其中只有空调器比例和气温两因子发生变化 ($\Delta\omega_7$) 的贡献率为 38%。2000 年空调致冷耗能相对于基准值增加了 75.2 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，其中单

一因子变化贡献最大的仍然是 $\Delta\omega_3$ ，贡献率达 18%；位居第二位的仍然是 $\Delta\omega_4$ ，贡献率达 12%；气温变化的总贡献率达 62%，其中只有空调器比例和气温两因子发生变化 ($\Delta\omega_7$) 的贡献率为 35%。相对于气候偏暖不明显的年份，如 2004 年降温强度仅比 1971—2000 年 30 a 均值偏高 2.8 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ，这一年空调致冷耗能相对于基准值增加 66.1 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，单纯气温发生变化的贡献率仅为 0.2%，气温变化总贡献率为 5%。

综上所述，在气候显著偏暖的年份，对于空调致冷耗能增加量的贡献，无论是单一气温因子，还是气温变化总的贡献都很大。如果未来气候继续变暖，而空调拥有比例达到近乎饱和，增长率放缓，那么气温变化对空调致冷耗能增加的贡献会更大。

4 结论

总的来说，无论气候变暖或变冷，随着人口、人均住宅建筑面积、城镇家庭空调器拥有比例的不断增长，北京住宅空调致冷耗能不可避免地增加。在上述 4 个影响因子中，气候是目前为止唯一可能对空调致冷耗能增加起到抑制作用的因子。由于 1995 年以来北京城镇家庭空调器拥有比例显著增长，城镇家庭空调器拥有比例这一因子对空调致冷耗能增量的贡献率普遍最大。这种现象有比较明显的时代特征：我国经济目前处于高速发展时期，人们的物质生活有了飞速的发展，未来如果空调器拥有比例接近饱和，增长率会放缓，该因子对空调致冷耗能增量的贡献率将有所下降。在 1996—2007 年气候显著偏暖的年份，对于空调致冷耗能增加量的贡献，无论是单一气温因子变化，还是气温变化总的贡献都很大。如果未来气候继续变暖，空调拥有比例达到近乎饱和的程度，那么气温变化对空调致冷耗能增加的贡献会更大。 ■

参考文献

- [1] 宋燕, 季劲钧. 气候变暖的显著性检验以及温度场和降水场的时空分布特征 [J]. 气候与环境研究, 2005, 10 (2): 157-165
- [2] 江志红, 李建平, 屠其璞, 等. 20 世纪全球温度年代和年代际变化的区域特征 [J]. 大气科学, 2004, 28 (4): 545-558

- [3] 龙惟定. 试论我国暖通空调业的可持续发展 [J]. 暖通空调HV&AC, 1999, 29 (3): 25-30
- [4] 陈峪, 叶殿秀. 温度变化对夏季降温耗能的影响 [J]. 应用气象学报, 2005, 16 (增刊 1): 97-104
- [5] 张清. 我国北方冬季持续变暖对采暖的影响 [J]. 气象, 1997, 23 (11): 39-41
- [6] 陈莉, 方修琦, 李帅. 气候变暖对我国严寒地区和寒冷地区南界及采暖能耗的影响 [J]. 科学通报, 2007, 52 (10): 1195-1198
- [7] 北京市统计局. 北京统计年鉴2007 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2008
- [8] 中国建筑科学研究院, 重庆大学. 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准 JCJ134—2001 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 3-8
- [9] 付祥钊. 夏热冬冷地区建筑节能技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004
- [10] 中华人民共和国建设部. 民用建筑热工设计规范 (GB50176—93) [S]. 北京: 中国计划出版社, 1993: 5-7
- [11] 中华人民共和国建设部. 夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准 (JCJ75—2003) [S]. 北京: 中国计划出版社, 2003
- [12] Sarak H, Satman A. The degree-day method to estimate the residential heating natural gas consumption in Turkey: a case study [J]. Energy, 2003, 28: 929-939

Influence Factor Analysis of Urban Residential Cooling Energy Consumption by Air Conditioners in Beijing During 1996—2007

Chen Li¹, Li Shuai², Fang Xiuqi³, Chen Kun⁴

(1 Harbin Meteorological Bureau, Harbin 150080, China; 2 Heilongjiang Research Institute of Meteorological Sciences, Harbin 150030, China; 3 School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4 The No.1 Construction Engineering Corporation of Heilongjiang Province, Harbin 150060, China)

Abstract: Based on meteorological data and social-economic statistical data, influence factor analysis of urban residential cooling energy consumption in Beijing was performed. Some conclusions are drawn: under given architecture design standard, four factors, including cooling intensity, urban population, per capita urban housing area and air conditioner ratio, directly affect the urban residential cooling energy consumption by air conditioners. In general, the amount of cooling energy consumption tends to increase inevitably because the later three factors increase continuously. Among four factors, climate is the only one that can act to save energy sometimes. In Beijing, the speed of urbanization is large, the contribution of the air conditioner ratio to increase in cooling energy consumption ranks the first in most years.

Key words: urban residential building; cooling energy consumption by air conditioner; influence factor; contribution ratio; urbanization; climate change