

针对空调系统设计的气候区域性特征研究

王志强, 徐象国

(浙江大学制冷与低温研究所, 杭州 310027)

(Tel:0571-87953944, Email:zjuxgxu@zju.edu.cn)

摘要: 空调设备的降温除湿能力能够更好地匹配当地的降温除湿需求, 既能够为用户创造更舒适的室内环境, 也可以避免因输出与需求之间的错配而导致的能源浪费。本文对空调系统设计的气候区域特性进行研究。以 67 个代表城市的气象参数为研究对象, 利用能耗模拟软件 EnergyPlus 建立模型, 考察不同的气候对建筑负荷所带来的影响。根据负荷显热比, 将这些城市分为 3 个区, 并进一步分析负荷在时间上的分布特性, 进而对空调系统的区域化设计提供指导。

关键词: 空调系统设计, 气候特性, 区域化, 显热比

RESEARCH ON REGIONALLY CLIMATIC CHARACTERISTICS FOR THE DESIGN OF HVAC SYSTEMS

Wang Zhiqiang Xu xiangguo

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract When the cooling and dehumidification capacity of a piece of air-conditioning equipment meets the requirement for a particular region, not only can better indoor thermal environment be created, but also energy waste by the mismatch of supply and demand can be avoided. This paper is aimed at regionally climatic characteristics for designing HVAC systems. 67 city files were selected. EnergyPlus was used to carry out energy simulation in order to examine the climatic effects on building loads. Based on sensible heat ratio, these cities were divided into 3 groups. Further analysis on load characteristics in terms of distribution on time was made, which can serve as a reference for regionally HVAC system design.

Keywords HVAC system design Climatic characteristics Regionalization Sensible heat ratio

*基金项目:

作者简介: 徐象国, (1981-), 男, 博士, 副教授, 博士生导师。

0 前言

随着我国经济的发展,生活水平显著提升,空调系统越来越成为现代建筑中不可缺少的一个部分^[1]。空调系统一个重要的职能,就是维持室内空气的温度、湿度,以满足人们对于室内热舒适日益提高的要求。空调系统在对室内的温、湿度进行控制时,往往需要同时处理显热负荷和潜热负荷。理想情况下,空调系统的降温除湿能力需与显热负荷与潜热负荷相匹配,否则室内的温湿度参数将无法满足人们的需求。换句话说,为了使空调系统能够在整个空调季内都维持对室内热湿环境的控制能力,就不仅仅要求其总冷量能够覆盖总负荷,还要求其输出显热比(即输出的显热制冷量在总冷量中的占比,表征了空调降温除湿能力的分配)的变化范围能够覆盖负荷显热比(即显热负荷在总负荷中的占比,表征了室内降温除湿的需求)的变化范围^[2-4]。我国幅员辽阔,从南至北,经历热带、亚热带,直至亚寒带;从东至西,横跨季风气候、大陆性气候、草原气候、沙漠气候、高山气候。在如此复杂的气候条件下,室内环境控制所需处理的热湿负荷往往呈现出明显的地域特点^[5]。

然而,目前我国空调系统的设计与生产,并未充分考虑空调设计地域性特点。一方面,我国空调系统设计流程对空调系统区域性设计的需求重视不够。在现有的空调系统设计体系中,整个设计的基础是确定建筑的“峰值负荷”,而对显热负荷在总负荷中的占比(负荷显热比)不加考虑,更不用说热湿负荷的地域性分布特点^[6, 7]。另一方面,我国现有的国家标准针对空调系统区域性设计的规定未考虑湿度的影响。GB 50176-2016《民用建筑热工设计规范》中将我国划分为寒冷地区、夏热冬冷地区等5个地区。这一分区已经为业界广泛接受。但是这一标准是针对建筑热工设计颁布的,仅将温度作为分区的指标,因此无法直接用于空调系统的设计与生产。而少有的针对空调系统设计气温划分的国家标准同样对湿度考虑不足,例如 GB/T 7725-2004《房间空气调节器》仅以温度为唯一指标,将室外气温划分为高温气候、温带气候以及低温气候。这使得目前的空调系统设计生产体系仅具有非常有限的地域气候适应性。通俗的讲,即卖到北京(夏季干燥炎热)的空调和卖到广州(夏季潮湿闷热)的空调,并无显著区别。

根据我国的地域气候特点,建立具有地域气候适应性的新空调设计体系,意味着可以使得空调设备的降温除湿能力能够更好地匹配当地的降温除湿需求,既能够为用户创造更舒适的室内环境,也可以避免因输出与需求之间的错配而导致的能源浪费。本文对空调系统设计的气候区域特性进行研究。以67个代表城市的气象参数为研究对象,利用能耗模拟软件 EnergyPlus 建立模型,考察不同的气候对建筑负荷所带来的影响。比较不同气候对建筑负荷影响的差异,进而对空调系统的区域化设计提供指导。

1 气候特征模型建立

本研究利用能耗模拟软件 EnergyPlus,建立建筑模型,对不同气象条件下的建筑进行能耗模拟,以考察气候特性对建筑负荷的影响。

1.1 代表城市选取

本研究沿用 GB 50176-2016《民用建筑热工设计规范》中的建筑热工区划,即严寒地区(1)、寒冷地区(2)、夏热冬冷地区(3)、夏热冬暖地区(4)和温和地区(5)等5个地区。首先,考察在地域空间上空调季的室内热湿负荷分布特征,选取我国南方地区,即夏热冬冷地区、夏热冬暖地区和温和地区的城市作为研究对象。其次,考察不同地区下负荷特征在时间上的分布特征,再选取4个代表城市进行对比分析。4个代表城市分别为:北京、上海、广州和昆明。空调季按照国家相关标准(JGJ 134-2010)中的定义,是从6月15日到8月31日。

1.2 模型说明

本研究的建筑模型采用了 ASHRAE Standard 140-2014 中的基础算例模型 600。ASHRAE Standard 140-2014 中的算例是美国暖通空调工程师协会(American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, ASHRAE)设计用来检测不同能耗模拟软件计算结果的。基础算例 600 的几何结构如图 1 所示。模型为单层单房间形式,占地面积 48m^2 ($6\text{m}\times 8\text{m}$),高 2.7m ,窗户总面积为 12m^2 的且均在建筑南面。

需要说明的是,本研究采用的模型并不能代表某一类实际建筑。事实上,对于不同类型的建筑,其模拟能耗结果的绝对值必然存在差异。但是,在不同气候条件下,采用相同的建筑模型时,由建筑类型引起的差异也是相同的,即模拟结果的相对值不受影响。另一方面,该模型几何参数简单,且窗户均在南面,对气象参数中太阳辐射的影响具有较高的敏感性,使得模拟结果能较好地反映出辐射得热在不同气候下的差异。因此,本研究采用此模型进行计算。

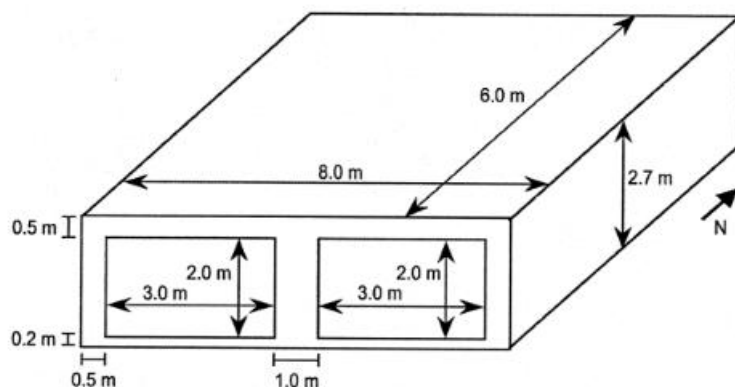


图 1 建筑模型几何结构示意图

1.3 模型参数设置

模型的参数主要包含两个部分：气象参数，建筑模型内部参数。

气象参数是本研究的重点，也是 EnergyPlus 模型运行的一个重要参数。EnergyPlus 官网上提供了可直接用于模拟的气象文件，我国气象文件的数据来源大多来自于中国标准气象数据。该数据由中国气象局和清华大学联合开发，能够反映该地区历史上气象规律，作为标准年用于建筑热环境的研究。按照热工分区，本研究一共选用了 67 个城市的气象文件，这 67 个城市位于我国南方地区（夏热冬冷地区、夏热冬暖地区和温和地区）。

建筑模型内部参数主要有围护结构性能、室内温湿度参数和建筑得热来源等。考虑到热工分区对围护结构的要求，各分区内围护结构的热力参数按照 GB 50189-2015《公共建筑节能设计标准》中规定的限制分别进行设置。设置参数如表 1 所示。由于温和地区（5）没有限值，故采用与夏热冬暖地区（4）同样的数据。室内温度设置为 26℃，湿度设置为 40-60%。（GB 50736-2012, JGJ 134-2010）对于建筑得热来源，本模型主要涵盖了 3 类：人员、渗透和新风引入。人员是建筑内热湿源之一，会同时产生热负荷和湿负荷。室内其他热源，例如灯光、设备等等不在本模型中考虑。虽然这不负荷实际情况，但是气候对于建筑负荷影响的相对性并没有改变。渗透和新风所带来的负荷，能反映室外气象条件对室内负荷的影响，尤其是湿负荷。人员设置为 3 人，渗透率和通风率分别设置为 0.5 次/h 和 1 次/h。

输出参数主要为建筑在空调季内的逐时潜热负荷和显热负荷。

表 1 建筑围护结构设置参数

	传热系数/(W/(m ² · K))			太阳得热系数 (SHGC)		
气候区	3	4	5	3	4	5
屋顶	0.7	0.9	0.9	-	-	-
外墙	1.0	1.5	1.5	-	-	-
外窗	3.0	4.0	4.0	0.52	0.48	0.48

2 气候特征数据分析

分别运行 67 个城市的建筑模型，得到的负荷结果即视为该城市的气候特征数据。本节将对模拟获得的气候特征数据进行分析。

2.1 气候负荷空间分布特性

在讨论负荷特性时，显热比（Sensible Heat Ratio, SHR）是一个重要参数。显热比分为两类：负荷显热比（Application Sensible Heat Ratio, ASHR）和输出显热比（Equipment Sensible Heat Ratio, ESHR）。负荷显热比定义为显热负荷在总负荷中的占比，表征了室内降温除湿的需求；输出显热比定义为空调系统输出的显热制冷量在总冷量中的占比，表征了空调降温除湿能力的分配。由此可见，显热比反映了总冷量/负荷中显热部分与潜热部分的相对关系。根据模拟得到的逐时显热负荷和潜热负荷，可以计算出各气象数据下的逐时总负荷和逐时负荷显热比以及整个空调季的总负荷和平均负荷显热比。这些平均 ASHR 的值中，最小为 0.216，位于云南腾冲（温和地区），最大为 0.617，位于福建福州（夏热冬暖地区）。其中

12 座典型城市的平均负荷显热比如表 2 所示。

表 2 典型城市的平均负荷显热比

城市	平均 ASHR	城市	平均 ASHR
昆明	0.348	重庆	0.541
成都	0.418	杭州	0.542
贵阳	0.443	南京	0.546
上海	0.502	广州	0.565
长沙	0.523	武汉	0.576
合肥	0.532	福州	0.617

负荷显热比反映了显热负荷与潜热负荷的相对大小,同时也反映了空调系统对所需处理负荷不同的降温除湿要求。为了反映这种差异在空间上的分布,按照各城市平均 ASHR 的大小,将这些城市分为 3 个区域。分区标准如表 3 所示。67 座城市的 ASHR 在空间上的分布如图 2 所示。

表 3 平均 ASHR 分区标准

分区名称	指标
小 ASHR 区	$ASHR \leq 0.445$
中 ASHR 区	$0.445 < ASHR \leq 0.55$
大 ASHR 区	$ASHR > 0.55$

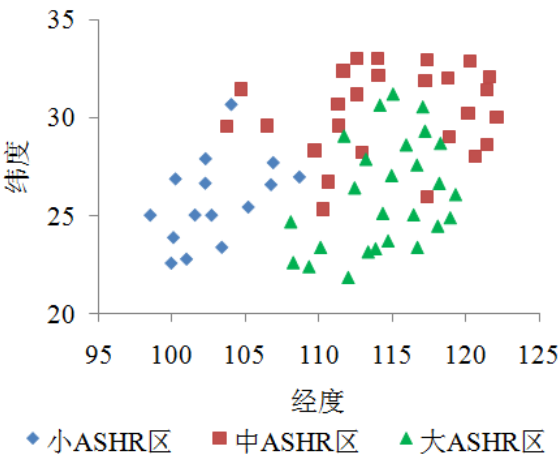


图 2 ASHR 空间分布示意图

从图 2 可以看出,城市 ASHR 的分布确实存在着区域性,即 ASHR 大小在一个范围内的城市在地理空间上也聚集在某一个区域里。为了更直观地反映这一地域性,将这些离散的点在地图上区域化,如图 3 a)中所示。将此分区与建筑热工分区(如图 3 b)所示)对比,发现两者具有一定程度的一致性。小 ASHR 区全部位于温和地区;中 ASHR 区全部位于夏热冬冷地区;大 ASHR 区包括了全部夏热冬暖地区和夏热冬冷地区的南部区域。之所以有这样的重合度,一个重要的原因就是来自于显热负荷的一致性。从温和地区到夏热冬冷地区再到夏热冬暖地区,夏季室外平均气温越来越高,度日数也越来越大,而这正是建筑热工分区的划分指标。而这两个指标越大,显热负荷也会变大,在潜热负荷量级相当时,负荷显热比自然也会越大。至于两个分区不符的区域,很大一部分原因是受到潜热负荷的影响。说明同样在夏热冬冷地区,即便显热负荷相当,由于潜热负荷绝对大小不同,其 ASHR 不同,降温除湿需求不同。

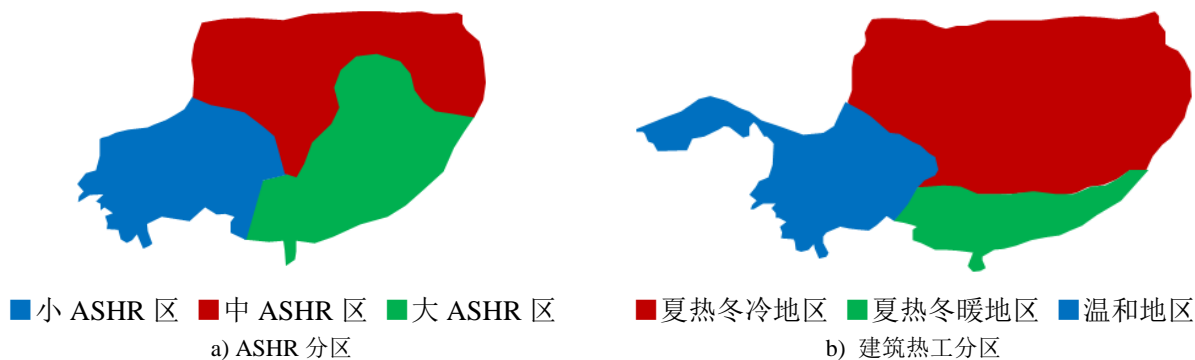


图 3 不同标准下的分区图

2.2 气候负荷时间分布特性

上一小节分析了负荷在空间上的分布特性。虽然 ASHR 能反映出一定的区域性，但是由于 ASHR 是一个相对值，不能反映出参数的绝对大小，对于空调系统设计所能提供的信息仍然是不足的。本小节将从时间上讨论气候特征，以获取更多负荷信息。

进一步分析每个城市在空调季共 78 天内每天 24 个小时的逐时总负荷 (qt) 和逐时 ASHR 的变化。图 4 展示的是上海的结果。从图中可以看出逐时总负荷和 ASHR 的大致变化规律。在清晨和夜晚，逐时总负荷与 ASHR 较小，而在上午和下午较大，且在下午某个时刻出现峰值。这一结果与日照的时间紧密相关。将不同城市之间的曲线图进行对比，发现虽然每个城市图像的绝对数值不同，但图 4 展现出的“峰状”特征在所有图像中均有呈现，表现出一定的共性。这反映了负荷在时间上的特性。

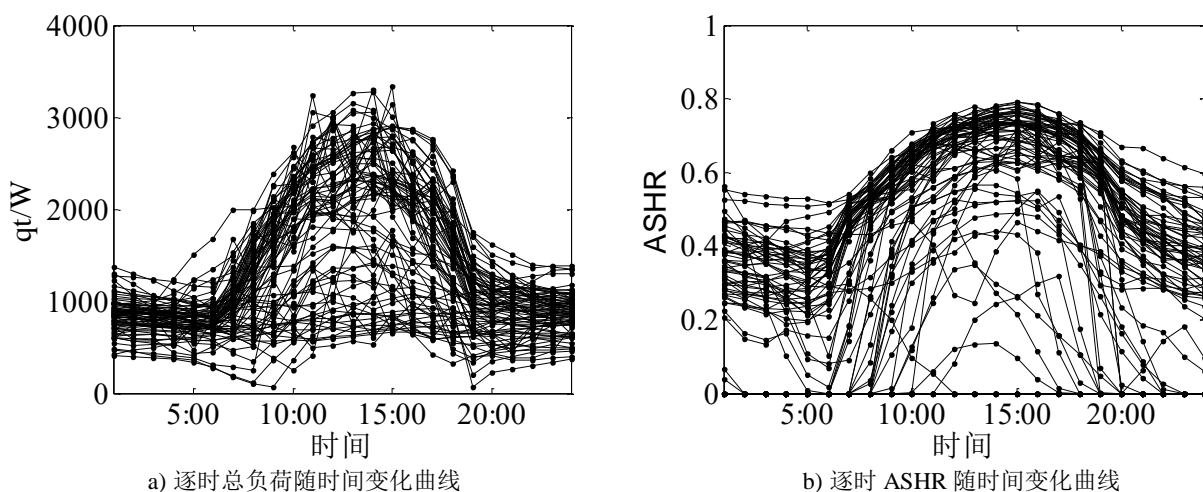


图 4 逐时总负荷与 ASHR 随时间变化曲线

注意到在清晨和夜晚，逐时总负荷和 ASHR 均较小。与有日照的白天相比，这些时段通常都是人们对空调需求较小的时间。甚至在一些特定的室外温湿度条件下，仅靠直接引入新风就能维持室内的热舒适度。为进一步筛掉这些数据，使得气候负荷的时间特性更具代表性，本研究采用计算预测平均评价 (Predicted Mean Vote, PMV) 的方法。具体方法为：计算当室内温湿度分别为该时刻室外温湿度时的 PMV，将 PMV 不超过 +0.5 时所对应的负荷数据筛选掉。除了温度和湿度参数外，计算 PMV 时的其他参数值如表 4 所示。

表 4 PMV 计算参数

状态	代谢率/Met Units	衣阻/clo	室内平均风速/(m/s)
日间(7:00-22:00)	1.1	0.55	0.15
夜间(22:00-7:00)	0.7	1.4	0.1

将每个小时的总负荷与 ASHR 表示在同一张图里，以便更好地查看负荷绝对值的分布。图 5 展示了上海的结果。图 5 a)、b) 分别表示考虑 PMV 前后的数据情况。可以看到，在考虑了 PMV 后，(1) ASHR 为 0 或者较小的数据点被排除掉；(2) 逐时总负荷较小的点被排除掉；(3) 数据点变得更加集中，且在

图像的左下部（逐时总负荷与 ASHR 均较小）尤其密集。

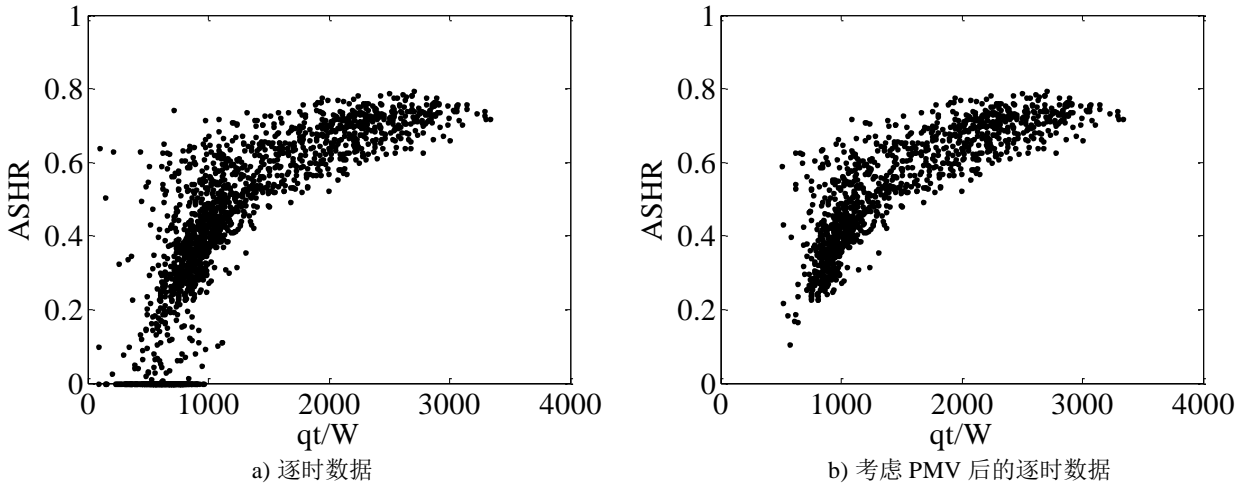


图 5 逐时数据分布图

为了更加直观地显示数据点密度分布的情况，作图 5 b) 的密度分布图。图 6 分别展示了上海（夏热冬冷地区，中 ASHR 区）和阳江（夏热冬暖地区，大 ASHR 区）两个城市的结果。需要注意的是，在作密度图时，为了保证横纵坐标数据类型的一致性，将横坐标和纵坐标分别定为逐时显热负荷（qs）与逐时潜热负荷（ql），本质上来讲，与 ASHR - qt 图像是一样的。

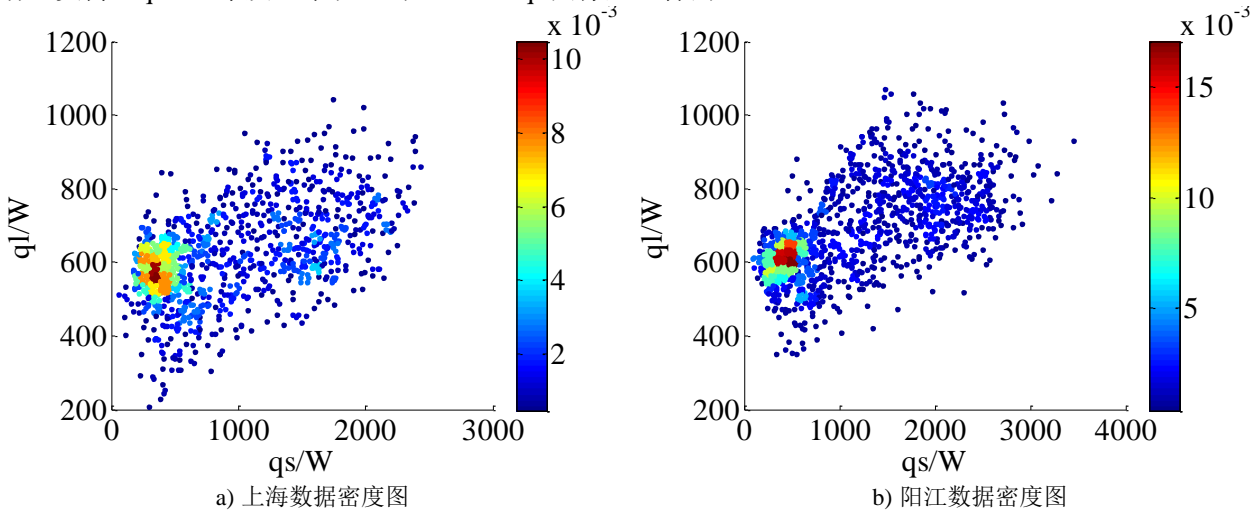


图 6 城市逐时数据密度示意图

从图 6 可以看出负荷在不同 ASHR 分区（空间分布特性）下其时间分布特性的不同。虽然两个分区下时间分布的所覆盖的区域形状类似，但是数据的绝对大小，尤其是显热负荷的大小明显不同。另外，虽然两个分区下数据点密集的区域位置相近，但是数据点的密集程度仍然存在着差异。

2.3 气候负荷特性与空调制冷量输出特性关联

正如前文所述，本研究的目的是使空调系统能够满足整个空调季的降温除湿需求，即使空调系统的输出显热比（ESHR）与负荷显热比（ASHR）相匹配。已有学者对直膨式房间空调器的输出特性进行了研究，探索了在不同压缩机转速、风机转速等条件下，空调器能够输出的总冷量与输出显热比之间的关系，结果如图 7 所示。可以看出，空调系统能够输出的总冷量与显热比在一定的四边形区域内^[8]。

研究气候特性能够将气候对负荷引起的影响加以区分，这样就可以在不同的地区去有针对性地去设计空调系统，最大限度地另空调系统的输出特性图像能够覆盖到当地的负荷特性分布，在设计阶段就考虑空调系统工作的范围，有利于更高效设计方案的产生。

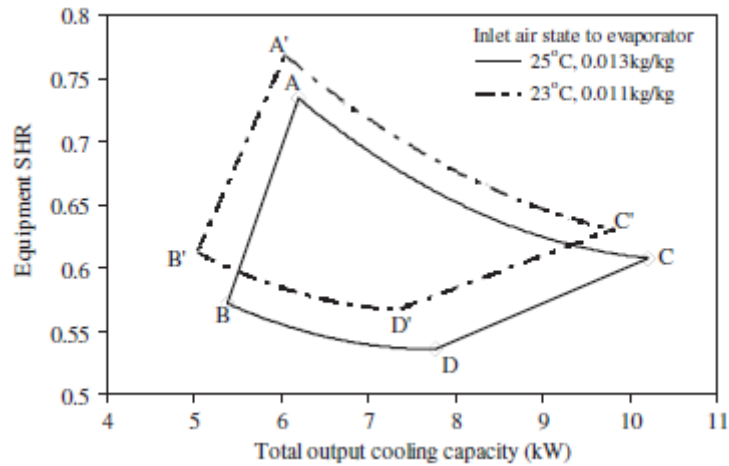


图 7 空调器输出特性示意图^[8]

3 结论

本文对空调系统设计的气候区域特性进行研究，结论如下：

(1) 我国气候复杂多样，不仅体现在建筑的热工设计上，也体现在空调系统的设计上。通过 EnergyPlus 软件对我国南部 67 座城市进行模拟，发现我国气候在空间和时间分布的特性。按照负荷显热比（ASHR）分，可将我国南部分为三个区，反映了在空间上降温除湿需求的不同；进一步分析逐时负荷的分布情况，不同 ASHR 分区下，负荷在时间上分布特性不同，表现为负荷值的频次分布差异。

(2) 气候区域特性可与空调系统的输出特性相结合，产生更加具有地区适应性、更为高效的空调系统设计方案。

参考文献

- [1]. Yan, D., et al., A thorough assessment of China's standard for energy consumption of buildings. Energy and Buildings, 2017. 143: p. 114-128.
- [2]. Li, Z., et al., Further study on the inherent operating characteristics of a variable speed direct expansion air conditioning system. Applied Thermal Engineering, 2014. 66(1-2): p. 206-215.
- [3]. Murphy, J., Dehumidification performance of HVAC systems. ASHRAE journal, 2002. 44(3): p. 23.
- [4]. Lin, Z. and S. Deng, A study on the characteristics of nighttime bedroom cooling load in tropics and subtropics. Building and Environment, 2004. 39(9): p. 1101-1114.
- [5]. Zhang, H. and H. Yoshino, Analysis of indoor humidity environment in Chinese residential buildings. Building and Environment, 2010. 45(10): p. 2132-2140.
- [6]. Huang, P., G. Huang and Y. Wang, HVAC system design under peak load prediction uncertainty using multiple-criterion decision making technique. Energy and Buildings, 2015. 91: p. 26-36.
- [7]. 丁德等, 浙江大学动物实验中心空调设计. 暖通空调, 2013. 43(9): 第 19-23, 110 页.
- [8]. Xu, X., et al., Inherent correlation between the total output cooling capacity and equipment sensible heat ratio of a direct expansion air conditioning system under variable-speed operation (XXG SMD SHR DX AC unit). Applied Thermal Engineering, 2010. 30(13): p. 1601-1607.