

气候变化对室外设计条件和冷负荷峰值的影响

杨 柳, 齐静妍, 霍旭杰, 牛兵兵

(西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 通过分析中国五个主要气候区中的五个代表城市在两个 30 年里(1971—2000 年和 1984—2013 年)的设计干球温度(DDBT)和同时发生湿球温度(CWBT), 研究了气候变化对室外设计条件和制冷负荷峰值的影响。研究结果发现 1984—2013 年的 DDBT 往往高于 1971—2000 年, 但是 1984—2013 年的 CWBT 和相应的室外空气焓值在不同的保证率水平下均小于 1971—2000 年。与由于室外空气焓降低而导致的新风负荷减少相比, 因温度升高而通过建筑物围护结构所产生的传导热的增益相对较小, 这导致在五个主要气候区中冷负荷峰值均降低。这个结果与普遍认为的全球变暖将使室外设计条件更加严格, 从而导致更高的冷负荷峰值和更大的供暖、通风和空调(HVAC)设备系统的观点相反。

关键词: 室外设计条件; 室外空气焓; 气候变化; 冷负荷峰值降低

中图分类号: TU 111

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)04-0463-09

Impact of climate change outdoor design conditions and reduction in peak cooling loads

YANG Liu, QI Jingyan, HUO Xujie, NIU Bingbing

(School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: We have examined the impact of climate change on outdoor design conditions and implications for peak cooling loads by analysing the design dry-bulb temperature(DDBT) and coincident wet-bulb temperature(CWBT) for two 30-year periods(1971—2000 and 1984—2013) in five cities within the five major climate zones across China. DDBT during 1984—2013 tends to be higher than that during 1971—2000, but the CWBT and the corresponding outdoor enthalpy during 1984—2013 are smaller than 1971—2000 at different significance levels. Increase in conduction heat gain through the building envelope due to rising temperature is relatively small compared with the reduction in fresh air load due to lower outdoor air enthalpy. This has resulted in a reduction in the peak cooling loads in all five major climates. This is in contrast to the generally held view that global warming would lead to more stringent outdoor design conditions, and hence higher peak cooling loads and larger heating, ventilation and air conditioning(HVAC) plants.

Key words: outdoor design conditions; outdoor air enthalpy; climate change; reduction in peak cooling load

目前关于气候变化对建筑能耗的影响及其缓解方法的研究很多, 这些研究大都采用建筑能耗模拟或度日的方法, 根据不同的排放情况使用未来的气象数据, 研究未来多年建筑能耗的变化, 并提出了可能的缓解措施^[1-10]。同时, 还对气候变化对一般建筑环境设计的影响进行了研究, 特别是关于供暖、通风和空调设备的室外设计条件的研究。这些研究通过分析干球温度或湿球温度变化的历史测量数据^[11-14]和基于大气环流模型的未来气象数据^[15-16]的变化, 发现了干球温度和湿球

温度均有上升的趋势, 并预计未来几年的冷负荷峰值将会增加。这个发现对于确定冷却设备的大小具有重要意义, 大多数 HVAC 和相关的建筑能源系统在进行重大改造或更换之前通常有大约 20 年之久的寿命。目前大多数研究都集中在分析干球温度和湿球温度的潜在趋势, 很少有人研究极端或接近极端的干球温度和湿球温度同时发生的情况以及相应的室外空气焓值。温度升高不一定会导致更极端的室外设计条件和更大的冷负荷峰值, 例如当最大设计干球温度的同时发生湿球温

收稿日期: 2020-11-20

修改稿日期: 2021-07-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51838011)

第一作者: 杨 柳(1970—), 女, 博士生导师, 主要研究绿色建筑与建筑节能。E-mail: yangliu@xauat.edu.cn

通信作者: 齐静妍(1994—), 女, 硕士, 主要研究绿色建筑设计与技术。E-mail: 463731606@qq.com

度呈下降趋势时,相应的室外空气焓值会降低,从而导致冷负荷峰值也降低^[17-18]。这是因为由于室外空气焓值降低而减少的新风负荷超过了由于全球变暖而增加的通过建筑围护结构的传导热增益。

本文通过分析长期干球温度和湿球温度的同时发生情况,确定当设计干球温度和设计湿球温度以及相应的室外空气焓值同时发生时室外设计条件是否有增加或减少的趋势。研究了气候变化导致的室外设计条件的变化趋势,并量化了不同气候下冷负荷峰值降低的可能性。还讨论了采用焓控制的省热装置循环系统下的 HVAC 系统的含义,以及确定冷负荷峰值的同时发生辐射强度的相关概念。

1 主要气候区和代表城市

中国的气候南到亚热带,北到温带^[19]。建热工设计分区主要有五种,即严寒、寒冷、夏热冬冷、温和和夏热冬暖。这种简单的气候分类主要涉及传导热增益/损失和相应的隔热问题^[20]。本研究选择了每个主要气候区中的一个城市作为代表,选择标准主要基于两个因素:首先,所选的城市必须在经济活动和人口密度方面具有合理的代表性,这样才能对全国建筑节能计划 and 环境政策产生较大影响;其次,它需要具有分析所需的长期实测气象数据。据此选择了哈尔滨、北京、武汉、昆明和广州分别代表严寒、寒冷、夏热冬冷、温和和夏热冬暖地区。图 1 显示了五个主要气候区和相应的五个代表性城市的总体布局,图 2 是从中国国家气象中心获得的五个城市当地气象站的 43 年长期实测(1971—2013 年)干球温度和湿球温度。

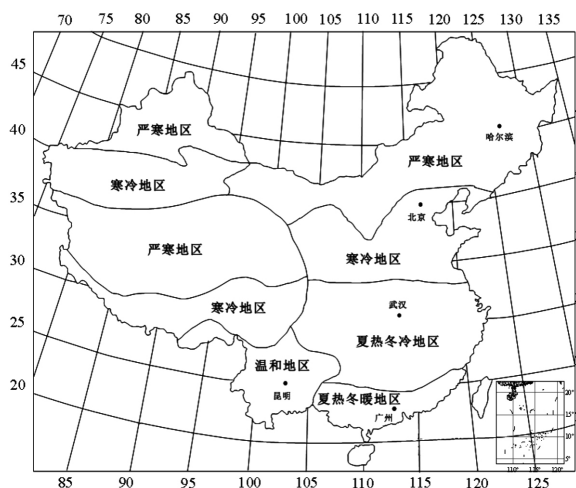
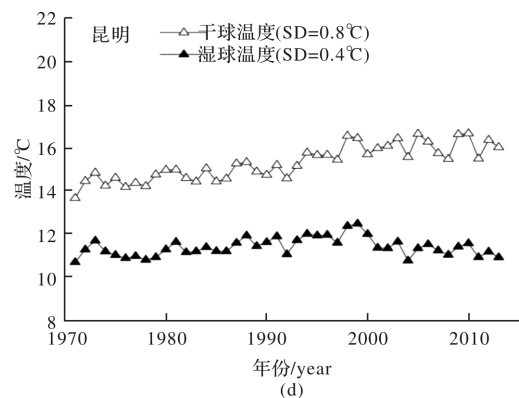
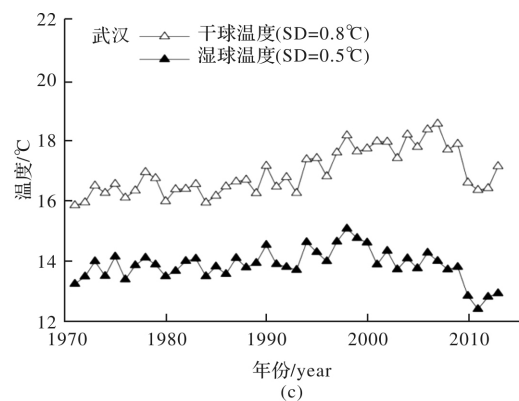
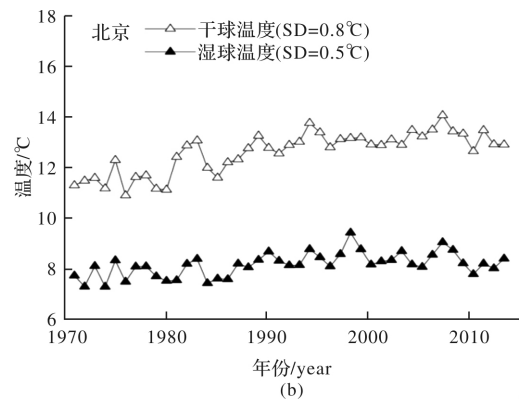
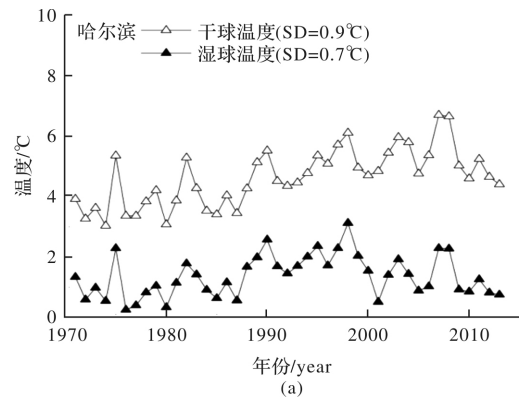


图 1 主要气候区和五个城市的位置

Fig. 1 Major climate zones and locations of the five cities

2 温度和焓的长期趋势

在一般工程实践中,干球温度和湿球温度是决定 HVAC 系统设计和分析室外设计条件的两个气象参数。



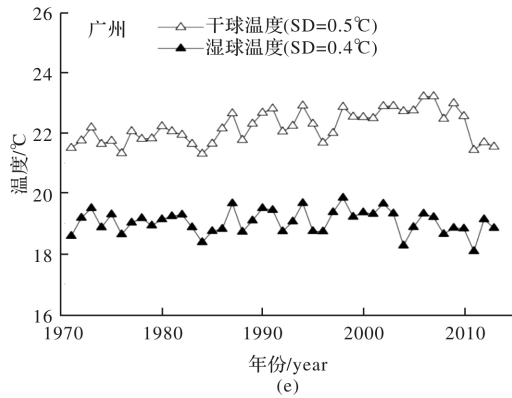


图2 1971—2013年温度变化趋势

Fig. 2 Long term (1971—2013) temperature trends
(SD = standard deviation)

图2显示了这两种温度在43年(1971—2013)期间的年变化。干球温度的标准差在广州为 0.5°C , 哈尔滨为 0.9°C ; 湿球温度的标准差在广州为 0.4°C , 哈尔滨为 0.7°C 。可以看出干球温度比湿球温度变化更大, 南方温暖气候区的年变化小于北方寒冷气候区。尽管有变化, 但干球温度和湿球温度都有明显的上升趋势。为了确定季节变化是否有差异, 本文考虑了夏季和冬季的长期趋势, 以最热月份(6~8月)和最冷月份(12~2月)作为夏季和冬季进行研究。表1显示了干球温度和湿球温度的长期趋势, 五个城市的全年、夏季和冬季的所有干球温度斜率均为正值, 即均呈上升趋势, 冬季的湿球温度也有类似的上升趋势。北京、武汉和广州的夏季湿球温度显示出明显的下降趋势, 这些地区在炎热的夏季通常需要大幅降温。昆明的季节性温差比较明显, 冬季比夏季高出一倍多。为了更清楚地认识气候对 HVAC 设计和分析的影响, 本文从干球温度和同时发生湿球温度确定了空气焓值, 因为 HVAC 的设计和涉及新风焓(即能源含量)的变化, 而不仅仅是干球或湿球温度的变化, 特别是当采用焓控制的省热装置循环系统来调节新风比以充分利用“自然冷却”^[21-23]时。表1还显示了焓值的长期趋势, 在所有五个城市中, 焓值和湿球温度显示出相同的上升和下降趋势, 这说明了新风焓值潜在分量的重要性。广州全年和夏季的室外空气焓值略有下降, 表明在炎热潮湿的夏季中潜冷的重要性, 这涉及到室外设计条件选择中干球温度峰值和湿球温度峰值是否同时发生的问题。如果相应的焓值较低, 寒冷的天气不一定会导致更严格的室外设计条件和更大的 HVAC。因此, 分析室外设计条件在长期趋势中的同时发生情况, 并研究近年

来的气候变化对设计条件和相应的热负荷和冷负荷峰值的影响非常重要。

表1 1971—2013年干、湿球温度和焓变趋势

(正值为上升, 负值为下降)

Tab. 1 Slopes of the long-term (1971—2013) dry-bulb temperature (DBT), wet-bulb temperature (WBT) and enthalpy trends (positive = rising, negative = decreasing)

城市	周期	DBT	WBT	焓值
哈尔滨	全年	0.050	0.041	0.079
	夏季	0.047	0.030	0.092
	冬季	0.053	0.050	0.062
北京	全年	0.051	-0.001	-0.010
	夏季	0.051	-0.010	-0.039
	冬季	0.046	0.016	0.026
武汉	全年	0.040	-0.003	-0.010
	夏季	0.032	-0.008	-0.031
	冬季	0.031	-0.002	-0.001
昆明	全年	0.055	0.007	0.013
	夏季	0.039	-0.006	-0.019
	冬季	0.079	0.022	0.049
广州	全年	0.021	-0.002	-0.010
	夏季	0.019	-0.011	-0.040
	冬季	0.021	0.011	0.030

3 室外设计条件的变化

热负荷计算和 HVAC 设备选型时广泛应用的计算参数是代表极端或接近极端条件的室外干球温度和湿球温度^[17,24]。一般方法是分析逐时温度的出现频率和累积频率分布, 基于该频率为特定地区或特定气候选择室外设计条件。

3.1 设计条件的差异

一般来说, 计算参数有两组主要的干球温度和湿球温度: 一是设计干球温度 (DDBT) 和设计湿球温度 (DWBT); 二是设计干球温度 DDBT 和同时发生湿球温度 (CWBT), 这里的 CWBT 定义为 DDBT 下所有湿球温度的平均值。DDBT 和 DWBT 在室外设计参数计算时的取值是分别单独统计的, 代表了最极端状态下的负荷, 即最大负荷情况; DDBT 和 CWBT 是同时刻同状态的空气中的干球温度与湿球温度。目前的设备选型等计算一般都采用 DDBT 和 DWBT, 得到的是满足最极端情况的结果, 但存在的问题是这个最大负荷情况不一定真实存在, 可能会造成计算结果偏大。通常情况下选择 CWBT 比选择 DWBT 更为准确实际, 因为极端干球温度和极端湿球温度同时发生的概率要低于这两个极端温度单独出现的概率。为了解基于这两对极端温度的室外设计条件在不

同气候区域的差异,分析了干球温度和湿球温度的累积出现频率,并总结了五个城市的累积分布情况,如图 3 所示.一般认为以 30 a 为周期的气候条件可以代表当地的主要天气状况^[25],因此这些分布是基于最新的 30 a(1984—2013 年)长期数据,分布的两端表示极端和接近极端的情况.一般的工程实践是根据某些极端情况在一年中可能发生的频率来选择室外设计条件,在这项研究中考虑了五个不同的显著性水平:夏季为 0.4%、1%和 2%,冬季为 99%和 99.6%.在这五个显著性水平下确定了五个城市的室外设计条件,总结见表 2.可以看出,基于 DDBT/DWBT 的室外设计条件比相应的同时发生条件更为极端.选取的湿球温度的差异(即 CWBT 减去干球温度),从哈尔滨在显著性水平为 99.6%(冬季)下的 0.1℃到北京在显著性水平为 0.4%(夏季)下的-5.6℃不等.在冬季,CWBT 高于 DWBT,表明五个城市的冬季设计条件都不是特别极端.在夏季,CWBT 比 DWBT 小,这也表明室外设计条件没有那么极端,夏季的差异往往比冬季更大.此外,对于高不保证率要求下(即在 0.4%的显著性水平上),其差异要大于一般要求(即在 1%和 2%的显著性水平上).在广州,基于 DDBT/DWBT 和 DDBT/CWBT 的夏季室外设计条件在 1%显著性水平上且在选定的湿球温度下的差异是 1.3℃.这表明,如果考虑到同时发生,那么夏天可以采用湿度较低的条件.如

果选择了基于 DDBT / DWBT 的过于极端的条件,则 HVAC 设备选型(就潜在冷却而言)将过大,这会对空调设备产生重要的能耗影响,广州夏季炎热潮湿,潜在冷却在整个建筑冷负荷中占很大比例.

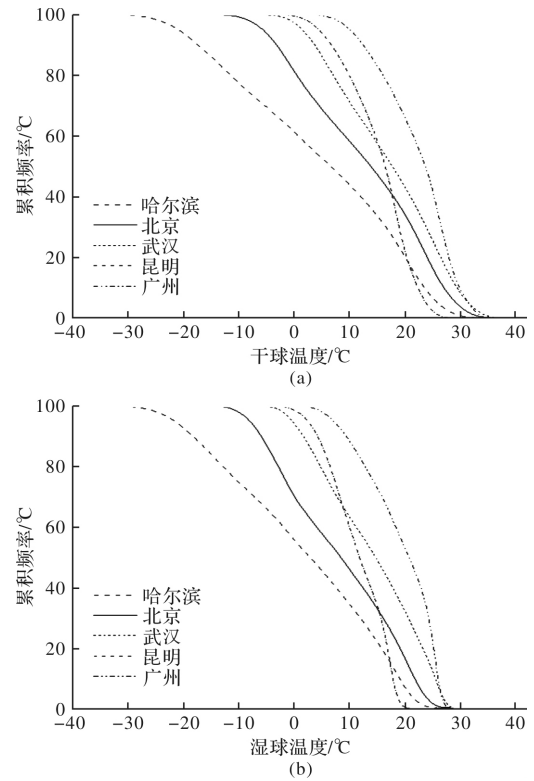


图 3 五个城市的干、湿球温度累积频率分布

Fig. 3 Cumulative frequency distributions for dry-bulb and wet-bulb temperatures for the five cities(1984—2013)

表 2 DDBT、DWBT 与 CWBT 及其对应焓值在不同显著性水平下的差异(1984—2013)

Tab. 2 Summary of design DBT(DDBT) with design WBT(DWBT), DDBT with its coincident WBT(CWBT) and corresponding enthalpy at different significance levels(1984—2013)

		显著性水平(冬季)				显著性水平(夏季)					
		99.6%		99%		2%		1%		0.4%	
		温度/℃	焓值 /kJ·kg ⁻¹	温度/℃	焓值 /kJ·kg ⁻¹	温度/℃	焓值 /kJ·kg ⁻¹	温度/℃	焓值 /kJ·kg ⁻¹	温度/℃	焓值 /kJ·kg ⁻¹
哈 尔 滨	DDBT/DWBT	-28.6/ -29.2	-28.7	-26.2/ -26.9	-26.2	28.4/22.4	66.5	29.7/23.3	70.0	31.2/24.1	73.1
		-28.6/ -29.1	-28.6	-26.2/ -26.6	-25.9	28.4/19.9	57.4	29.7/20.7	60.2	31.2/19.3	55.3
	DDBT/CWBT	-28.6/ -29.1	-28.6	-26.2/ -26.6	-25.9	28.4/19.9	57.4	29.7/20.7	60.2	31.2/19.3	55.3
		0.1	0.1	0.3	0.3	-2.5	-9.1	-2.6	-9.8	-4.8	-17.8
北 京	DDBT/DWBT	-10.6/ -12.3	-8.9	-9.0/ -11.0	-7.2	31.7/24.7	74.8	33.0/25.4	77.7	34.3/26.2	81.2
		-10.6/ -11.5	-8.0	-9.0/ -10.2	-6.2	31.7/21.7	63.1	33.0/21.1	60.9	34.3/20.6	59.0
	DDBT/CWBT	-10.6/ -11.5	-8.0	-9.0/ -10.2	-6.2	31.7/21.7	63.1	33.0/21.1	60.9	34.3/20.6	59.0
		0.8	0.9	0.8	1.0	-3.0	-11.7	-4.3	-16.8	-5.6	-22.2
武 汉	DDBT/DWBT	-3.0/ -4.3	2.4	-1.6/ -3.0	4.5	33.7/27.4	86.4	34.7/27.9	88.7	35.8/28.3	90.6
		-3.0/ -3.7	3.2	-1.6/ -2.4	5.4	33.7/26.4	81.8	34.7/26.6	82.7	35.8/26.6	82.6
	DDBT/CWBT	-3.0/ -3.7	3.2	-1.6/ -2.4	5.4	33.7/26.4	81.8	34.7/26.6	82.7	35.8/26.6	82.6
		0.6	0.8	0.6	0.9	-1.0	-4.6	-1.3	-6.0	-1.7	-8.0

续表 2

		显著性水平(冬季)				显著性水平(夏季)					
		99.6%		99%		2%		1%		0.4%	
		温度/℃	焓值 /kJ·kg ⁻¹	温度/℃	焓值 /kJ·kg ⁻¹	温度/℃	焓值 /kJ·kg ⁻¹	温度/℃	焓值 /kJ·kg ⁻¹	温度/℃	焓值 /kJ·kg ⁻¹
昆明	DDBT/DWBT	0.6/ -1.4	9.3	2.0/ -0.3	11.5	25.5/19.1	63.2	26.4/19.4	64.4	27.2/19.8	66.0
	DDBT/CWBT	0.6/ -1.1	9.9	2.0/0.5	12.8	25.5/16.4	53.3	26.4/16.2	52.6	27.2/15.8	51.2
	差值	0.3	0.6	0.8	1.3	-2.7	-9.9	-3.2	-11.8	-4.0	-14.8
广州	DDBT/DWBT	5.5/2.7	14.2	6.8/4.0	16.7	33.2/27.0	84.9	33.8/27.3	86.3	34.7/27.6	87.7
	DDBT/CWBT	5.5/3.9	16.5	6.8/4.7	18.0	33.2/26.0	80.4	33.8/26.0	80.4	34.7/26.1	80.8
	差值	1.2	2.3	0.7	1.3	-1.0	-4.5	-1.3	-5.9	-1.5	-6.9

为了解设备的超大型程度, 确定了相应的焓值, 总结如表 2 所示. 可以看出焓差从哈尔滨 99.6%显著性水平(冬季)下的 0.1 kJ/kg 到北京 0.4%显著性水平(夏季)下的 -22.2 kJ/kg 不等. 同样, 在高不保证率要求下的焓值往往比一般要求下有更大的差异. 就热负荷和冷负荷峰值而言, 新风焓差主要影响新风负荷和渗透热得失. 为了更好地了解对热负荷、冷负荷峰值的影响以及相应的设备规模, 我们建立了一个通用办公楼模型^[6]. 通用办公楼模型是一个 35 m×35 m, 层高 3.4 m 的 40 层幕墙建筑, 总建筑面积为 49 000 m². 全空调办公建筑的 HVAC 设计, 室内为正压, 以最大限度地减少渗透热的增加或损失. 当 HVAC 系统在办公时间之外(例如晚上)关闭时, 渗透仍会发生, 当 HVAC 在早晨开启时, 这将成为“下拉”负载. 但是和新风负荷相比, 由此产生的热增益或热损失往往较小可以忽略. 示例中只考虑了新风负荷. 室内设计条件假设冬季为 20℃/40%相对湿度(RH), 夏季为 25℃/50%RH, 新风量为 8.3 L/s·人⁻¹, 人口密度为 10 m²/人^[26-27]. 表 3 总结了五个城市的新风负荷设计值偏大的情况, 在夏季, 武汉、广州对新风负荷设计值在 2%显著性水平上的偏大率为 5.6%, 北京在 0.4%显著性水平上为 37.6%. 可以看到武汉和广州(夏季

都炎热潮湿)设计值偏大的比例最低, 出现这个结果是因为这两个城市在湿球温度和焓值方面的差异最小(参见表 2). 除此之外, 从北部的寒冷气候转移到南部的温暖气候时并没有特定的趋势或模式. 在冬季, 哈尔滨的新风负荷计算偏大量为 0.3%(99.6%显著性水平), 武汉为 25%(99.6%显著性水平). 与夏季相似, 在冬季没有观察到与气候相关的模式. 就实际功率而言, 夏季条件下对新风负荷的设计值设定偏大的差异很大, 从广州 2%显著性水平下的 219.6 kW 到北京 0.4%显著性水平下的 1 083.4 kW. 全空调办公建筑中, 由电气照明产生的热增益通常被视为建筑总冷负荷峰值的主要组成部分之一. 为了正确评价设计值偏大的程度, 对新风负荷偏大导致的冷负荷与电气照明导致的冷负荷进行了比较, 估计了电照明引起的内部热增益以及由此产生的冷负荷. 根据当前的工程实践和当地的设计、能源规范^[26-27], 假定电照明的功率密度为 9 W/m², 冷负荷为 441 kW. 从表 3 中可以看出, 在五个主要气候区的三个不保证率水平上, 由于新风负荷偏大造成的冷负荷的确很显著, 约为 40 层写字楼内整个照明设备散热造成的冷负荷的一半(武汉和广州为 2%显著性水平)至近三倍(北京为 0.4%显著性水平).

表 3 新风负荷偏大情况

Tab. 3 Summary of over-estimation of fresh air load

	显著性水平(冬季)				显著性水平(夏季)					
	99.6%		99%		2%		1%		0.4%	
	负荷/kW	%	负荷/kW	%	负荷/kW	%	负荷/kW	%	负荷/kW	%
哈尔滨	4.9	0.3	14.6	1.2	444.1	15.9	478.2	16.3	868.6	32.2
北京	43.9	11.3	48.8	16.1	571.0	18.5	819.8	27.6	1083.4	37.6
武汉	39.0	25.0	43.9	16.7	224.5	5.6	292.8	7.3	390.4	9.7
昆明	29.3	6.1	63.4	10.2	483.1	18.6	575.8	22.4	722.2	28.9
广州	112.2	13.9	63.4	7.2	219.6	5.6	287.9	7.3	336.7	8.5

3.2 室外设计条件的年变化

研究表明,室外设计条件选择不当会影响冷负荷峰值,从而影响 HVAC 设备的选型,气候变暖也会影响供暖和制冷系统的选择.普遍认为由于气候变化,极端天气会发生得更频繁.然而如前文所述,气温上升不一定会导致更极端的室外设计条件和更大的冷负荷峰值.如果湿球温度与设计干球温度峰值一致呈下降趋势,则会降低焓值,从而降低冷负荷峰值.为了分析室外设计条件的增减趋势,在评估气候变化对冷/热负荷峰值和 HVAC 选型的影响之前,需要研究其 DDBT 及 CWBT 的年变化.本文在 5 个显著性水平上测定了 43 年间(1971—2013 年)各年的 DDBT 和 CWBT,表 4 汇总了 5 个城市的 DDBT、CWBT 和相应的焓值的上升(正)或下降(负)的趋势.在冬季设计条件(即 99.6%和 99%显著性水平)下,所有五个城市的 DDBT、CWBT 和焓值都有增加的趋势,这表明由于五个主要气候区的气候变暖,冬季室外设计条件变得不那么极端.夏季的情况(即 0.4%、1%和 2%的显著性水平)与冬季相似,DDBT 在所有五个城市的三个显著性水平上均呈上升趋势.无论气候类型如何,全球变暖都会导致气温上升.除了昆明温和气候下的 0.4%显著性水平情况外,其余五个城市的 CWBT 和室外空气焓值均呈下降趋势,但上升趋势斜率只有 0.02,在整体趋势上可以忽略不计. CWBT 和焓值的下降趋势表明,尽管由于全球变暖导致干球温度有上升趋势,但当选择湿度较低的条件时,夏季冷负荷峰值会较低,特别是对于潜热较大的地区.因此,确定气候变暖是否确实会导致冷负荷峰值的增减非常重要.

表 4 DDBT、CWBT 和焓值的年变化趋势(1971—2013)

Tab. 4 Slopes of the yearly variations in design dry-bulb temperature(DDBT), coincident wet-bulb temperature(CWBT) and enthalpy during the 43-year period(1971—2013)

城市		显著性水平				
		99.6%	99%	2%	1%	0.4%
哈尔滨	DDBT	0.082	0.077	0.030	0.028	0.032
	CWBT	0.079	0.063	-0.028	-0.036	-0.004
	焓值	0.086	0.072	-0.107	-0.127	-0.021
北京	DDBT	0.057	0.061	0.055	0.054	0.050
	CWBT	0.093	0.095	-0.075	-0.064	-0.059
	焓值	0.117	0.124	-0.277	-0.236	-0.219
武汉	DDBT	0.037	0.040	0.031	0.035	0.034
	CWBT	0.035	0.032	-0.031	-0.015	-0.019
	焓值	0.056	0.052	-0.156	-0.085	-0.104

续表 4

城市		显著性水平				
		99.6%	99%	2%	1%	0.4%
昆明	DDBT	0.098	0.094	0.046	0.046	0.047
	CWBT	0.037	0.042	0.002	-0.031	-0.042
	焓值	0.076	0.080	-0.004	-0.105	-0.147
广州	DDBT	0.039	0.031	0.045	0.041	0.036
	CWBT	0.054	0.027	-0.021	-0.024	-0.022
	焓值	0.101	0.053	-0.087	-0.096	-0.091

+为上升趋势 -为下降趋势

3.3 气候变化及其对冷、热负荷峰值的影响

过去人们普遍认为,30 年记录的“标准”值和主要气候特征是相对稳定的,当最早的 10 年测量气象数据被最新的 10 年记录^[28]所取代时其气候特征变化很小.鉴于近年来有越来越多的研究数据表明全球变暖,分析气候变化是否会影响基于既定准则的室外设计条件的选择非常重要.为了研究气候变化对室外设计条件的影响,以及由此产生的热负荷和冷负荷峰值,本文考虑了两个 30 a 的记录期(1971—2000 年和 1984—2013 年).这两个记录期代表了本研究采用的 43 a(1971—2013 年)长期气象数据中最早和最近的 30 a.表 5 总结了两个 30 a 记录期的 DDBT、CWBT 和根据这两个 30 a 记录确定的相应焓值.可以看出,基于最近 30 a(1984—2013 年)的 DDBT 在五个城市的所有显著性水平上都高于基于 1971—2000 年的 DDBT,再次印证了由于全球变暖,干球温度有逐渐上升的趋势的结论. DDBT 的差异(即 1984—2013 年与 1971—2000 年的差值)从哈尔滨的 0.2℃(0.4%和 1%显著性水平)到昆明的 1.4℃(99%和 99.6%显著性水平)不等.冬季往往比夏季有更大的差异,这表明在 1971—2013 年的 43 年间,冬季气温的上升速度比夏季快. CWBT 的差异在夏季和冬季表现出不同的趋势,冬季 CWBT 在 1984—2013 年期间高于 1970—2000 年期间,差异范围从昆明显著性水平 99.6%下增加 0.1℃到北京显著性水平 99.6%下增加 1.5℃;夏季 CWBT 在 1984—2013 年期间低于 1970—2000 年期间,差异范围从哈尔滨显著性水平 1%下的 0.1℃到昆明显著性水平 0.4%下的 2.4℃.焓值的变化与 CWBT 的变化相似,冬季焓值的增加从哈尔滨 99.6%显著性水平的 0.2 kJ/kg 到昆明 99%显著性水平的 2.4 kJ/kg 不等,夏季焓值的变化范围从哈尔滨 1%显著性水平的 0.4 kJ/kg 到哈尔滨 0.4%显著性水平的 8.5 kJ/kg.

表 5 两个 30a 周期(1971—2000 和 1984—2013)的 DDBT、CWBT 和焓值
Tab. 5 Summary of design DBT(DDBT), coincident WBT(CWBT) and enthalpy based on
two 30-year periods(1971—2000 and 1984—2013)

城市		显著性水平(冬季)				显著性水平(夏季)					
		99.6%		99%		2%		1%		0.4%	
		DDBT CWBT /℃	焓值 /kJ·kg ⁻¹	DDBT CWBT /℃	焓值 /kJ·kg ⁻¹	DDBT CWBT /℃	焓值 /kJ·kg ⁻¹	DDBT CWBT /℃	焓值 /kJ·kg ⁻¹	DDBT CWBT /℃	焓值 /kJ·kg ⁻¹
哈尔滨	1971—2000	-29.1/ -29.3	-28.8	-26.9/ -27.2	-26.5	28.1/20.4	59.2	29.5/20.7	59.8	31.0/21.7	63.8
	1984—2013	-28.6/ -29.1	-28.6	-26.2/ -26.6	-25.9	28.4/19.9	57.4	29.7/20.6	60.2	31.2/19.3	55.3
	差值	0.5/0.2	0.2	0.7/0.6	0.6	0.3/-0.5	-1.8	0.2/-0.1	-0.4	0.2/-2.4	-8.5
北京	1971—2000	-11.6/ -13.0	-9.9	-10.0/ -11.6	-8.0	31.2/22.3	65.3	32.3/22.0	64.2	33.8/22.0	64.1
	1984—2013	-10.6/ -11.5	-8.0	-9.0/ -10.2	-6.2	31.7/21.7	63.1	33.0/21.1	60.9	34.3/20.6	59.0
	差值	1.0/1.5	1.9	1.0/1.4	1.8	0.5/-0.6	-2.2	0.7/-0.9	-3.3	0.5/-1.4	-5.1
武汉	1971—2000	-3.4/ -4.1	2.6	-2.0/-2.9	4.6	33.2/26.6	82.8	34.2/26.8	83.6	35.3/27.4	86.3
	1984—2013	-3.0/ -3.7	3.2	-1.6/-2.4	5.4	33.7/26.4	81.8	34.7/26.6	82.7	35.8/26.6	82.6
	差值	0.4/0.4	0.6	0.4/0.5	0.8	0.5/-0.2	-1.0	0.5/-0.2	-0.9	0.5/-0.8	-3.7
昆明	1971—2000	-0.8/ -1.2	9.5	0.6/-0.8	10.4	24.9/16.9	55.1	25.7/16.7	54.4	26.6/15.9	51.6
	1984—2013	0.6/ -1.1	9.9	2.0/0.5	12.8	25.5/16.4	53.3	26.4/16.2	52.6	27.2/15.8	51.2
	差值	1.4/0.1	0.4	1.4/1.3	2.4	0.6/-0.5	-1.8	0.7/-0.5	-1.8	0.6/-0.1	-0.4
广州	1971—2000	4.9/3.2	15.2	6.4/4.3	17.2	32.7/26.3	81.8	33.3/26.4	82.2	34.1/26.5	82.6
	1984—2013	5.5/3.9	16.5	6.8/4.7	18.0	33.2/26.0	80.4	33.8/26.0	80.4	34.7/26.1	80.8
	差值	0.6/0.7	1.3	0.4/0.4	0.8	0.5/-0.3	-1.4	0.5/-0.4	-1.8	0.6/-0.4	-1.8

为了确定夏季的冷负荷峰值大小, 本文对这五个城市的围护结构热增量和新风负荷进行了测定. 基于前面 3.1 节提到的一般建筑进行估算, DDBT 升高导致围护结构荷载的三个主要组成部分(即通过墙体、窗户和屋顶)的传导热增加, 以及焓变减小导致新风负荷减少. 有关建筑围护结构设计资料见表 6. 计算中假定窗墙比为 40%, 图 4 显示了这五个城市在 2% 显著性水平下建筑围护结构热增量和新风负荷变化的情况, 建筑围护结构热增量从哈尔滨的 6 kW 到昆明的 23 kW 不等, 新风负荷降低幅度从武汉的 48.8 kW 到北京的 107.4 kW 不等. 通过这些研究可以观察到两点, 首先, 当从北方的寒冷气候转移到南方的温暖气候时没有特定的趋势或模式; 其次, 与所有五个城市新风负荷的减少相比, 通过建筑围护结构(即墙、窗和屋顶)的传导热增益增加的幅度很小. 这

说明由于 DDBT 的适度增加, 新风负荷的减少量往往会超过热传导的略微增加量, 这使得武汉的冷负荷峰值净减少了 34 kW, 北京则减少了 95.6 kW. 这个研究结果表明气候变化不会像普遍预期的那样导致需选用更大型的制冷设备. 事实上, 由于 CWBT 减小, 焓值也会更小, 室外设计条件不那么极端, 所以稍小型的制冷设备就可以满足. 本文对冬季也进行了在 99% 显著性水平下的类似分析, 图 5 总结了五个城市传导热损失和新风负荷的变化以及相应的采暖负荷峰值降低的情况. 通过建筑围护结构的热量损失减少幅度从武汉的 11.6 kW 到昆明的 53.7 kW 不等, 新风负荷减少幅度从哈尔滨的 29.3 kW 到昆明的 117.1 kW 不等. 新风负荷的减少很大程度上降低了导热热损失, 说明了焓变的重要性.

表6 基于各城市规范的围护结构传热系数

Tab. 6 U-values for wall and window based on the design/energy code in the five cities(Ref. [27])

W/(m ² · K)				
城市	气候区	墙体	窗户	屋顶
哈尔滨	严寒	0.37	2.0	0.28
北京	寒冷	0.48	2.3	0.45
武汉	夏热冬冷	0.76	2.6	0.50
昆明	温和	1.42	2.8	0.66
广州	夏热冬暖	1.42	2.8	0.66

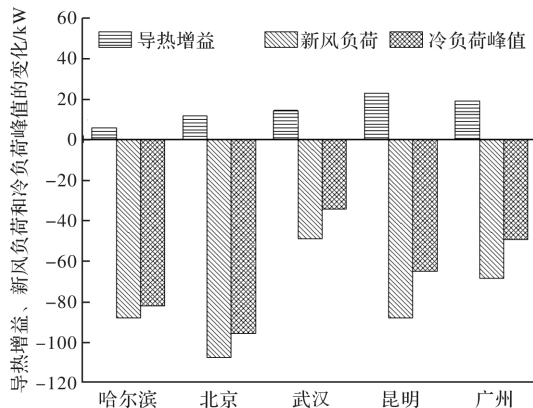


图4 建筑围护结构导热增益、新风负荷和冷负荷峰值的变化

Fig. 4 Summary of changes in building envelope conduction heat gain, fresh air load and peak cooling loads

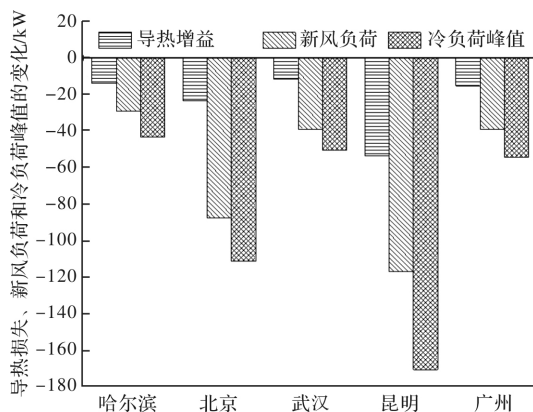


图5 建筑围护结构传导热损失、新风负荷和热负荷峰值的变化

Fig. 5 Summary of changes in building envelope conduction heat loss, fresh air load and peak heating loads

4 讨论

实际工况下往往会受到太阳辐射的影响。

一般的工程做法是根据建筑的冷负荷峰值来确定 HVAC 设备的大小,而建筑的冷负荷峰值又根据室外设计条件(即 DDBT/CWBT)和通过窗户和天窗的最大辐射热量(如果有的话)来确定,其中最大辐射强度(W/m^2)并不总是与室外最高温度

一致。因此另一种更合适的方法是使辐射强度与 DDBT/CWBT 同时发生,这种方法的主要困难是太阳辐射和 DDBT/CWBT 的同时发生情况因设计不同而不同。不同朝向、宽高比的建筑物在一天中的不同时间和一年中的不同时间会有不同的太阳热增益峰值。根据设想,与 DDBT/CWBT 同时发生的太阳辐射热增益将小于相应的峰值。例如透过水平屋顶的天窗的太阳热量,水平表面上的最大辐射强度出现在太阳高度达到最大时。理论上,这发生在中午 12 点(太阳时间),但实际上室外干球温度的峰值往往出现在下午。因此,与 DDBT/CWBT 一致的水平天窗获得的辐射热量将小于中午的峰值。逐时建筑能耗模拟可以通过分析每小时冷负荷来考虑建筑负荷的差异性和一致性^[29-31],但这往往是针对特定的建筑设计和能量分析,而不是针对一般的建筑和工程应用。本文认为,在确定冷负荷峰值和相应的 HVAC 规模时,应考虑同时发生辐射热增益的概念。与 DDBT/CWBT 同时发生的辐射强度信息对建筑师和工程师很有用,特别是在考虑不同建筑方案的初始设计阶段。因此作者认为应开发一个数据库,其中包含基于中国不同气候区内所有主要城市的实测全球太阳辐射的八个主要方位的 DDBT/CWBT 和水平面的不同保证率水平的太阳辐射强度(W/m^2)信息。此外,鉴于人们对建筑物集成光伏应用的兴趣与日俱增,还应开发包含不同方向、不同重要度的太阳可用性信息(以 MJ/m^2 为单位的日均太阳辐射量)的数据库。这将使设计者对他们提议的 BIPV 方案可能的太阳能潜力有一个很好的了解。这些数据库应构成建筑和 HVAC 设计的更全面的本地设计指南/规范的一部分。

5 结论

本文研究了中国五大气候带内五个城市 43 a (1971—2013 年)长期实测的干球和湿球温度,以及相应的新风焓。还通过分析两个 30 年周期(1971—2000 年和 1984—2013 年)的设计干球温度(DDBT)和同时发生湿球温度(CWBT),研究了气候变化对室外设计条件和冷负荷峰值的影响。结论如下:

1984—2013 年的 DDBT 有高于 1971—2000 年的趋势,但 1984—2013 年的 CWBT 和相应的室外焓在不同的保证率水平上均小于 1971—2000 年。与因新风焓降低而减少的新风负荷相比,由于温度升高而增加的通过建筑围护结构的传导热增益

相对较小. 这导致了所有五个主要气候区的冷负荷峰值都有所降低. 这与人们普遍认为的全球变暖将导致更严格的室外设计条件,从而导致更高的冷负荷峰值和更大的供暖、通风和空调(HVAC)设备的观点相反.

参考文献 References

- [1] LI D H W, YANG L, LAM J C. Impact of climate change on energy use in the built environment in different climate zones-A[J]. *Review Energy*, 2012,42: 103-112.
- [2] SCOTT M J, WRENCH L E, HADLEY D L. Effects of climate change on commercial building energy demand[J]. *Energy Sources*, 1994,16:317-332.
- [3] RADHI H. Evaluating the potential impact of global warming on the UAE residential buildings a contribution to reduce the CO₂ emission[J]. *Build Environ*, 2009,44:2451-2462.
- [4] GUAN L. Implication of global warming on air-conditioned office buildings in Australia[J]. *Build Res Inform*, 2009,37:43-54.
- [5] WANG X, CHEN D. Assessment of climate change impact on residential building heating and cooling energy requirement in Australia[J]. *Build Environ*, 2010, 45:1663-1682.
- [6] WAN K K W, LI D H W. Future trends of building heating and cooling loads and energy consumption in different climates [J]. *Build Environ*, 2011, 46: 223-234.
- [7] GUAN L. Energy use, indoor temperature and possible adaptation strategies for air-conditioned office buildings in face of global warm ing[J]. *Build Environ*, 2012,55: 8-19.
- [8] ROETZEL A, TSANGRASSOULIS A. Impact of climate change on Comfort and energy performance in offices[J]. *Build Environ*, 2012,57: 349-361.
- [9] WAN K K W, LI D H W, PAN W. Impact of climate change on building energy use in different climate zones and mitigation and adaptation implications[J]. *Appl Energy*,2012,97:274-282.
- [10] NIK V M, KALAGASIDIS A S. Impact study the climate change on the energy performance of the building stock in Stockholm considering four climate uncertainties[J]. *Build Environ*,2013,60: 291-304.
- [11] LEVERMORE G J, KEEBLE E. Dry-bulb temperature analyses for climate change at three UK sites in relation to the forthcoming CIBSE Guide to weather and solar data[J]. *Build Serv Eng Res Technol*,1998, 19: 175-181.
- [12] WRIGHT A J. Evidence for climate change relevant to building design in the UK, 1976-2000[J]. *Build Serv Eng Res Technol*,2002,23: 279-285.
- [13] DELFANI S, KARAMI M, PASDARSHAHRI H. The effects of climate change on energy consumption of cooling systems in Tehran[J]. *Energy Build*,2010,42: 1952-1957.
- [14] THEVENARD D, SHEPHARD M W. Temperature trends for locations listed in the tables of climatic design conditions in the 2013 ASHRAE Handbook-Fundamentals[J]. *ASHRAE Trans*,2014,120:133-146.
- [15] CHOW D H C, LEVERMORE G, JONES P. Extreme and near-extreme climate change data in relation to building and plant design[J]. *Build Serv Eng Res Technol*,2002,23: 233-242.
- [16] WATKINS R, LEVERMORE G J. Quantifying the effects of climate change and risk level on peak load design in Buildings[J]. *Build Serv Eng Res Technol*, 2011,32: 9-19.
- [17] LAM J C, HUI S C M. Outdoor design conditions for HVAC system design and energy estimation for buildings in Hong Kong[J]. *Energy Build*,1995,22: 25-43.
- [18] THEVENARD D, GUEYMARD C A. Updating the ASHRAE climatic data for design and standards[J]. *ASHRAE Trans*,2010,116(Part 2): 444-459.
- [19] ZHAO S. Physical geography of China [M]. New York:Van Nostrand Reinhold, 1986.
- [20] 住房和城乡建设部. 民用建筑热设计规范:GB 50176-2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [21] MOHURD. Thermal design code for civil buildings: GB 50176-2016 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2016.
- [22] WANG S, XU X. Optimal and robust control of outdoor ventilation airflow rate for improving energy efficiency and IAQ[J]. *Build Environ*,2004,39: 763-773.
- [23] RACKES A, WARING MS. Alternative ventilation strategies in U. S. offices: Comprehensive assessment and sensitivity analysis of energy saving potential[J]. *Build Environ*,2017,116: 30-44.
- [24] GUAN L, BENNETT M, BELL J. Development of a climate assessment tool for hybrid air conditioner[J]. *Build Environ*,2014,82: 371-380.
- [25] LAM J C, TSANG C L, YANG L. Weather data analysis and design implications for different climatic zones in China[J]. *Build Environ*,2005,40: 277-296.
- [26] THEVENARD D. Influence of long-term trends and period of record selection on the calculation of climatic design conditions and degree days [J]. *ASHRAE Trans*,2010,116(Part1):447-460.