文章编号：1003-0344（2020）1-067-5

国内高校建筑热环境现场研究的现状及展望

李昇翰 曹丹纶
深圳大学土木工程学院

摘　要：本文从主客观两方面，对近年高校建筑的热环境现场研究进行了总结，着重分析了不同地域、研究对象等情况下的热环境状况，做出了全面的综述。目前，我国校园建筑热环境研究还不够全面。未来应该进一步对夏热冬暖、温和地区这两个气候区进行研究，并丰富现场研究的调查方式。从业人员可以基于测试者生理，心理反馈及调节行为，制定适应不同气候、不同对象的评价指标。

关键词：热环境 热舒适 高校建筑 现场研究 文献综述

Present Status and Development of Field Study on Thermal Environment in Domestic Universities

LI Sheng-han, CAO Dan-lun
College of Civil Engineering, Shenzhen University

Abstract: In order to make a comprehensive review, this paper summarizes researches on the thermal environment of campus buildings in recent years from both subjective and objective aspects and analyzes the thermal environment under different regions and research objects. As a result, the present research on the thermal environment of domestic campus buildings is not comprehensive enough. In the future, we should further study the two climate zones including the hot summer and warm winter zone and temperate zone with enrichment of the investigation methods. Practitioners can develop evaluation indicators that adapt to different climates and objects based on the physiological, psychological feedback and adjustment behavior of the testers.

Keywords: thermal environment, thermal comfort, campus buildings, field study, literature review

近年来，我国出现了高校新校区建设浪潮。随着建筑业的发展，教育建筑从标准化转而注重舒适与节能，国内已有许多关于高档居住建筑,办公写字楼以及其他大型公共建筑室内环境的研究。而与办公室和住宅空间相比，由于占用时间、热环境要求、居住者活动和服装等诸多因素差异，教学建筑需要特定的热环境研究[1]。国内外学者已运用不同理论方法，分别探究气候区和教育水平与热环境的关系。

目前为止，国内还没有关于热环境现场理论框架和具体调查综述性分析的研究。为了解该领域的发展现状，掌握整体观点，提供广泛的研究综述。本文调查了过去 13 年（2005~2018）里有关教育建筑热环境现场调查的研究，通过统计分析，对比并提取研究之间的相似性以及上述参数之间的关系。最后基于三个主要方面进行分类：气候区，建筑类型和研究方法，以及其他小类，包括研究年份、受访者数量和研究季节。由于研究数量有限和研究条件的多样性，建立精确的分析模型还不可能。所以，本文只对其中 25 篇有代表性的研究进行探讨。第一部分涉及现场研究的方法，包括客观调查和主观调查。第二部分综述这些研究基于不同气候区和建筑类型的结果和趋势。最后，进一步指明现有研究的不足和未来发展的趋势建议。

收稿日期：2018-11-12
作者简介：李昇翰（1985-），男，博士，讲师；广东省深圳市南山区南海大道 3688 号深圳大学土木工程学院（518060）；
E-mail: 472587162@qq.com
基金项目：国家自然科学基金资助（No. 51478267）

1 研究概述

1.1 客观研究

现场研究分主观和客观两方面。客观研究主要是对建筑室内、室外环境物理参数的测定。1962 年，Macpheron 提出了影响热舒适的 6 个因素：空气温度，平均辐射温度，空气流速，相对湿度，新陈代谢率和衣服热阻[2]。一般情况下客观研究的测试指标为室内、外空气干球温度，室内、外空气相对湿度，室内、外空气流动速度，室内、外黑球温度……使用的仪器包括 TSI 手持风速仪、黑球温度计、热球风速仪、干湿球温度计等。测量时间从几周[3-4]到一整年[5]的都有。对于一些研究，客观研究是唯一的调查方式[6-9]。在所有现场测量收集的参数中，温度是所有研究都会涉及的指标。Dedear 和 Brager 推荐全球热舒适数据库采用操作温度作为热舒适参数的计算指标，它是空气温度和平均辐射温度对各自的换热系数的加权平均值。因为在非高温情况下默认操作温度等于空气温度，故从测量结果中选取空气温度进行后一步计算。

1.2 主观研究

主观研究最主要的途径是问卷调查，采用的是描述法，即多项选择法。它的主要目的是收集学生对温度、湿度、风速等的主观评价和热感觉，同时了解受试者的背景信息和影响人体热舒适的两个客观因素：新陈代谢率和衣服热阻。所有评估的变量依据 ASHRAE 55 和 ISO 7730 标准。问卷调查把人体对上述因素的各种反应划分为若干等级，依据一定标准将每一种反应与等级对号入座。受试者根据自己的感觉,选出最能代表的数字等级。这些数字使得研究者得以对各种抽象的反应进行数学上的分析，研究结果从主观的感知性变成为客观的科学性。现在问卷内容有了一些改变：早期评估只包括热感觉和偏好的问题，但现在还会加入室内空气湿润度和空气流速甚至人员密度[10]。Mishra 和 Ramgopal 说，对于选择收集的调查对象数量或调查的持续时间，没有明确的约定。在本文涉及到的研究中，样本数量即有效问卷数量少至 45[11]多至超过 1200[2, 12-13]，分布非常广泛。主管研究中纵向和横向调查均有使用，有的还分别调查了男生和女生、不同年级在同一环境下的热反馈，虽然在大多数情况下结果并没有显示出明显的差异。

2 讨论

2.1 建筑气候划分

《民用建筑设计通则》对我国按照气候区划分为 7 个主气候区，分区名称包括严寒地区，寒冷地区、温和地区，夏热冬冷地区和夏热冬暖地区。西安是西北的教育中心，在建筑热工分区上属于寒冷地区，是高校热环境研究最先出现的地区之一。由于地处寒冷地区和夏热冬冷地区的交界处，西安地区在建筑设计和室内环境的处理上有着一定的特殊性和矛盾性。2003 年夏博调查发现高校宿舍的建筑围护结构没有很好地发挥隔热的功能，夏季室内酷热潮湿，冬季非供暖时段温度过低。供暖时段因为长时间门窗紧闭导致宿舍内换气量不足，空气品质差。他提出宿舍的建设应该尊重当地的地形和气候，保证绿化数量，同时加强利用窗、阳台等建筑构造，进行合理地规划[14]。

严寒地区与寒冷地区的区分条件是严寒地区年日平均气温≤5 ℃的日数不少于 145 d，而寒冷地区年日平均气温≤5 ℃的日数 90~145 d。严寒地区的热舒适研究多只针对冬季。哈尔滨作为极具代表性的严寒地区，已有许多相关的研究。Zhaojun Wang 将哈尔滨的供暖期分为前、中、后三个阶段，比较教室和宿舍在不同阶段的热环境和学生的反馈。结果显示教室的室内温度要高于宿舍，热期望温度却低于宿舍，且两者的热中性温度都处于上升趋势，这反映了人们对热环境的适应性。在问卷调查中，无论是在教室还是在宿舍，室内平均温度都要高于受试者的热中性温度，许多学生反映感觉到热，这说明室内供暖温度太高。作者认为如果将室内温度降至热中性温度，教室和宿舍分别可以节约 10.1%、3.8%的能源[15]。

夏热冬冷地区主要气候特征为冬季湿冷、夏季湿热，气温日差较小。罗明智于 2003 年 8 月对重庆大学的教室室内热环境做了抽样测试和问卷调查。作者分别将预测热舒适指标 PMV 和热感觉投票 TSV 对新有效温度 ET* 线性拟合，发现学生热舒适投票值普遍小于预测值。这是因为常年的校园生活让学生们对于环境有较强的适应能力，他们在心理上对教室内高温有了心理准备，期望值也会相应地降低[16]。此结论得到了夏一战学者的验证，他发现在高温的教室环境中，增加风速可以有效改善热环境。学生对风速的容忍程度也有所增加。但是进一步研究结果显示只有在高温高湿的环境下，风速才会对人的热舒适度造成影响[17]。

针对夏热东暖地区，Ruey-Lung Hwang 运用卡方检验，发现学生对教室内气温，风速和遮阳的满意度是影响热感觉的重要因素。同时性别也是重要的影响因素，但湿度的满足以及其他环境特性如室内空气质量

没有很大影响。通过与同样是夏热冬冷地区的新加坡和夏威夷地区比较，作者对比两地热期望温度与热中性温度的差别发现中性热感觉与受试者的热期望水平普遍不符[18]。夏热东暖地区夏季高温高湿，太阳辐射强烈，在学生相对集中且活动频繁的大学校园中，此种气候条件可能会造成学生的身体不适甚至中暑。但目前该地区的研究数量还是有限，需要学者加以重视。根据对现有文献的统计，夏热冬冷地区，寒冷地区和严寒地区的热舒适性的研究较多，夏热冬暖和温和地区的这类研究还相对较少。温和地区地域上包括云南大部、贵州、四川西南部、西藏南部小部分地区[19]，这类地区的研究基本还是空白，是未来的趋势之一。

2.2　研究对象

“高校建筑”是各高等学校为帮助学生和老师达成教学目的而提供的活动场所，是校舍、校园、运动场及附属设施的集合，其中校舍包括宿舍楼、教学楼、体育馆、活动中心、图书馆和游泳池等校内的各类建筑。

学生宿舍属于居住建筑，与一般的居住建筑不同，宿舍的居住人群为 18~25 岁的学生，人员密度和散热量大，空调等设备的使用也因学校设施和学生对环境的主观反映有所不同[7]。学生每天大部分时间待在宿舍，其室内热环境将对学生的生理和心理健康造成直接影响。万勇对位于绵阳地区的西南科技大学进行热环境调查，他在冬季选取新区东八宿舍楼首层，中间层和顶层各一间学生宿舍进行现场测试。测试结果显示学生宿舍室内干球温度波动小，最大日较差仅为 2.0 ℃，具有较好的热稳定性。室内相对湿度随室外波动变化小，但相对湿度普遍很高，有 42.5%的人对室内热舒适度表示满意或可接受[7]。吕留根则是对宿舍的不同位置进行现场测量，探究热环境参数在一日之中各个时间段的变化[20]。除了宿舍，教室也是广大师生接触最频繁的室内环境。李久芳考察发现南方地区高校教室冬季室内热环境舒适度基本达到要求，但存在着冬季室内温度偏低、空气流通差等问题。作者认为窗户的开启情况，窗户数量和位置对室内环境的舒适度有很大影响[21]。同时，邱静在对多个公共教室进行室内热环境调查和实测的基础上，选择一间实验教室进行对比测试，分析热源、窗户开闭对热环境的影响[22]。还有学者将教室和宿舍的室内热环境进行对比，他把供暖期分为前、中、后三个阶段，探究各个阶段两类场所内环境的变化，分析两个场所之间的物理参数差异以及出现原因[23]。

图书馆建筑与教学、科研工作关系密切，是校园内使用最频繁和人聚集数量最多的建筑之一。近几年，开始有学者对其他类型校园建筑进行研究。各大高校的图书馆虽然都安装了不同形式的空调系统和供暖系统，但不合理的使用和运行管理导致室内热环境并不理想。因此，改善图书馆热环境不仅能解决舒适问题，还能保护馆内重要书籍和文献，保证馆内师生们正常地工作、学习。刘开琼认为考虑到图书馆白天使用为主，应该选择具有良好热工指标的围护结构，并采取合理的通风方式，将围护结构内表面出现最高温度的时间和使用时间错开[8]。

目前，我国对于校园内的大空间建筑研究还不够，但越来越高的环境舒适度要求已经是社会发展的必然趋势[11]。何梅测试了西安 10 所高校食堂内的空气温度、空气湿度、二氧化碳浓度等环境指标，同时收集学生们对食堂环境的反馈。主观调查显示师生对室内湿度状况还是较为满意的，但对温度和空气质量并不满意，其中温度是不满意反馈最多的因素[24]。调查显示所有测试对象的湿度和二氧化碳指标是达标的，但温度指标都是超标的，这与师生们反馈一致。张玲玲针对北京地区高校食堂热环境存在的问题，结合相关标准规范对现场调查结果做出评价分析，得到有益于建筑物理环境舒适性的设计策略[25]。李建颖对西安市 12 所不同建造年代、不同使用功能的高校中、小型体育馆的使用特点进行调查，发现夏季体育馆内温度过高，不同着装、不同运动水平的使用者对环境的舒适感觉要求不同。需要通过加强通风等方式提高人员的热舒适[26]。

3　现有研究存在问题分析

人们对低能耗甚至零耗校园的关注推动了全世界范围内教育建筑研究的增多。近年来，研究焦点由建筑能耗逐渐转向热环境舒适度。由前文可知，现场测量是在我国现有研究中最为普遍的研究方式，目的是监测某个测点在特定时间段温度、湿度、空气流速等变量的变化。近来，国际学者开始使用建筑内长期热环境的指标，即以一长段时间为单位并考虑了所有的建筑区域。学者 MonTazami 和 Nicol 比较室内温度和热感觉发现惯用标准中的热舒适区域更宽，容易出现环境过热的情况[27]。在具体测量中，测点大多布置在室内的中间，将被测对象如教室视为整体热区域，没有充分考虑其建筑和结构特性[28]，事实上，太阳辐射下，由窗墙壁和气流引起的各种热辐射场可能会造成室内热区域布局不均匀。因此，现场热环境评估与受试者在房间中的位置有很重要的关系。

随着人们生活条件的改善，空调、暖气等机械通风手段变得非常普遍，与不同的加热、冷却和通风系统相关的热舒适性成了学者们关注的问题。国外一些研究率先评估了采用不同的加热系统[29]和通风系统[30-32]对学生的热舒适度的差异。还有一些研究比较了自然通风和机械通风教室的热环境[33-34]。同时，BIM 领域的发展带动了大量研究使用软件进行模拟，这使得预测具有不同结构特性的教育建筑的热环境成为可能。但是单纯的模拟研究缺乏来自学生的真实的热感受反馈。如果没有实际热投票值作为支撑，结果将会和实际调查有较大出入[35-36]。在用软件模拟过程中，随着参数的改变，适用的热舒适模型和标准不同，可应用于建筑设计的舒适温度相会随之变化，最终不能得出确定的结论。因此。学者接下来应该着力于制定针对微气候和不同建筑、结构特性的的热舒适标准。

4 总结

由于我国相关领域的发展时间不长，国内现有研究还远远不能覆盖现实的多种可能性。目前，国内研究仅限于测出热环境适宜与否，并不仔细探究背后的原因，研究结论大都止步于热舒适指标的确立，而对于后续建筑设计中可操作性的验证和实践缺乏必要的论述。未来研究的建议总结如下：

1) 由于中国地域跨度大，同一气候区观察到热中性的差异也很大。未来我国相关学者应该收集和分析不同气候带中现场研究的新数据库，强化对微观热舒适性的研究。

2) 重视基于测试者生理、心理反馈及调节行为如服装热阻及人体新陈代谢率， 发展适应不同气候、不同对象的热舒适定量评价指标。

3) 未来可进一步探索热环境对学生学习表现和能耗影响。

4) 发展长期指标，在建筑使用期间内从空间上评估热舒适度，如进一步对夏热冬暖、温和地区这两个气候区进行研究。

5) 热舒适度调查通常在特定季节进行，且受访者数量有限。未来研究应该在延长现场调查时间，增加受访者人数，以获得更为广义和普遍舒适温度范围。

6) 室内和室外气候相互影响，且都会影响人类的适应能力。应该从两方面进行热舒适性评估以获得更可靠的结果。

7) 充分考虑建筑和热学特性，比较不同参数下的热环境情况，并且建立这些特征和学生热感知之间的关系。

参考文献

[1] 赵雪. 北方地区某高校教学建筑室内热环境研究[D]. 天津: 天津大学, 2010

[2] 牛萌萌, 宣永梅,毛灿. 高校建筑夏季室内热环境研究现状与应用[J]. 绿色科技, 2016(02): p. 97-101.

[3] 屈万英. 高校既有学生公寓热环境研究[J]. 山西建筑, 2007,(8): 240-241.

[4] 朱卫兵,张小彬. 哈尔滨市某高校教室冬季热舒适研究[J].建筑热能通风空调, 2008, (5): 1-5.

[5] 杨薇, 张国强.湖南某大学校园建筑环境热舒适调查研究[J].暖通空调, 2006, (9): 95-101.

[6] 吕留根,王雅丽. 洛阳某高校宿舍热环境调查与评价[J].建筑节能, 2010, (10): 15-17.

[7] 万勇, 唐中华,晏旺. 四川盆地地区高校学生宿舍冬季室内热环境研究[J]. 绿色建筑, 2015, (4): 50-53.

[8] 葛翠玉, 赵华,周静. 高校图书馆夏季热环境分析及改善措施研究[J]. 山西建筑, 2006, (1): 207-208.

[9] Wang Z, X Zhang. Human Thermal Adaptation in University Classrooms and Dormitories in Chinese Severe Cold Area in Winter [J]. Procedia Engineering, 2016, 146: 24-31.

[10] 王琳, 肖益民. 重庆市高校学生宿舍夏季热环境质量实测研究[J]. 建筑热能通风空调, 2010, (2): 67-70+78.

[11] 刘开琼, 何江. 从热环境研究探讨华南地区高校图书馆绿色服务管理——以广西大学图书馆为例[J]. 农业图书情报学刊, 2013, (6): 148-151.

[12] 张样,尹琰琰. 高校建筑物夏季热舒适研究[J].安徽工业大学学报(自然科学版), 2007, (2): 225-228.

[13] 张宁,冉茂宇. 闽南高校教学楼夏季热环境实测分析[J].住宅与房地产, 2016, (9): 250-253.

[14] 夏博. 高校学生公寓室内热环境研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003

[15] Wang Z, Li A. Thermal adaptation and thermal environment in university classrooms and offices in Harbin[J]. Energy and Buildings, 2014. 77: 192-196.

[16] 罗明智, 李百战, 徐小林. 重庆夏季教室热环境研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2005, (1): 88-91.

[17] Zhang G, Zheng C. Thermal Comfort Investigation of Naturally Ventilated Classrooms in a Subtropical Region[J]. Indoor & Built Environment, 2007, 16: 148-158.

[18] Hwang R L, T P Lin, N J Kuo. Field experiments on thermal comfort in campus classrooms in Taiwan[J]. Energy and Buildings, 2006. 38(1): 53-62.

[19] 谢守穆.《建筑气候区划标准》GB50178-93 介绍[J]. 建筑科学, 1994, (4): 57-61.

[20] 管勇,陈超. 冬季兰州市高校教室热环境调查[J].环境与健康杂志, 2010, (2): 159-160.

[21] 李久芳, 吕宁. 广州某高校教室冬季热环境现场量测与评估分析[J]. 福建建筑, 2012, (8): 104-106.

[22] 吕留根,黄蕾. 洛阳某高校宿舍热舒适性调查与分析[J].制冷与空调, 2011, (2): 204-207.
[23] 张玲玲. 高校食堂餐厅物理环境现状及设计策略研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2015
[24] 何梅, 张进. 高校餐饮建筑夏季室内热环境调研[J]. 建筑节能, 2015, (4): 107-110.
[25] 胡天乐, 曹彬. 北京高校自习教室使用率对供暖季室内热环境的影响[J]. 暖通空调, 2015, (8): 98-101.
[26] 李建颖. 西安市高校体育馆夏季室内热环境研究[J].西安:西安建筑科技大学, 2014
[27] Montazami A, F Nicol. Overheating in schools: comparing existing and new guidelines[J]. Building Research and Information, 2013. 41(3): 317-329.
[28] Nico M A, S Liuzzi, P Stefanizzi. Evaluation of thermal comfort in university classrooms through objective approach and subjective preference analysis[J]. Applied Ergonomics,2015, 48:111-120.
[29] Zeiler W,G Boxem. Effects of thermal activated building systems in schools on thermal comfort in winter[J]. Building and Environment, 2009. 44(11): 2308-2317.
[30] Sarbu I, C Pacurar. Experimental and numerical research to assess indoor environment quality and schoolwork performance in university classrooms[J]. Building and Environment, 2015. 93: 141-154.
[31] Fong M L, V Hanby. Acceptance of thermal conditions and energy use of three ventilation strategies with six exhaust configuratio ns for the classroom[J]. Building and Environment, 2015. 94: 606 -619.
[32] Al-Rashidi K, D Loveday, N Al-Mutawa. Impact of ventilation modes on carbon dioxide concentration levels in Kuwait classrooms[J]. Energy and Buildings, 2012, 47: 540-549.
[33] Toftum J, B U Kjeldsen. Association between classroom ventilation mode and learning outcome in Danish schools[J]. Building and Environment, 2015, 92: 494-503.
[34] Mishra A K, M Ramgopal. A comparison of student performance between conditioned and naturally ventilated classrooms[J]. Building and Environment, 2015, 84: 181-188.
[35] Conceicao E Z E, M M J R Lú cio. Thermal study of school buildings in winter conditions[J]. Building and Environment, 2008, 43(5): 782-792.
[36] Hwang R L, S Y Shu. Building envelope regulations on thermal comfort in glass facade buildings and energy-saving potential for PMV-based comfort control[J]. Building and Environment, 2011, 46(4): 824-834.

（上接 101 页）

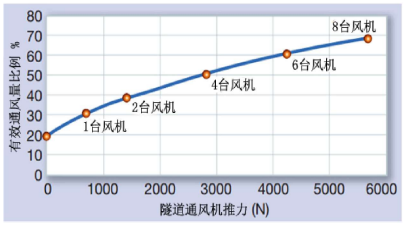

图 7 110 m³/s 通风量的有效空气流量与不同隧道通风机数量的关系

3　结论

地铁通风系统需要外部空气来控制地铁系统内的温度，为乘客提供新鲜空气，并且在紧急情况下，控制烟雾流动帮助乘客安全逃离。在某些情况下，可能需要对站点进行机械冷却以实现全年所需的条件。

通常，地铁通风系统的通风量由消防应急模式要求确定。通过对整个地铁通风系统和其他相关系统范围的参数设计，可以降低通过机械通风来控制温度和提供外部空气的需求。这种可持续的地铁系统通风设计方法既减少了系统对环境的影响，也降低了资金和运营成本。

参考文献

[1] 程远维.地铁通风空调系统设计及节能研究[J].交通建设,2018, (10): 274-275.
[2] 陆健东. 地铁通风空调系统节能的实现研究与思考[J]. 科技创新与应用, 2017, (18): 155-156.
[3] 汪振岭. 地铁通风空调系统节能的实现研究与思考[J]. 信息化建设, 2016, (3): 264.
[4] 徐文兵. 地铁通风空调系统节能的新进展分析[J]. 金属材料与冶金工程, 2015, (3): 57-58.
[5] 张海尚. 地铁车站通风空调智能控制系统的节能[J]. 城市轨道交通研究, 2018, (9): 45-48.
[6] 涂旭炜. 城市轨道交通通风空调设备选型附加系数探讨[J]. 隧道建设(中英文), 2011, 31(3): 334-339.
[7] Research and Special Programs Administration. Subway Environmental Design Handbook Volume II: Subway Environment Simulation Computer Program, US Version 4, Part 1[R]. Department of Transportation, 1997.
[8] C W Pope, D G Newman, G Matschke. The Factors Affecting Draught Relief and Air Temperature in an Underground Metro System [R]. 10th ISAVVT, Boston, 2000.