



## 填表说明

一、本报告中相关的技术或数据如涉及知识产权保护、军工项目保密等内容，请作脱密处理。

二、请用宋体小四字号撰写本报告，可另行附页或增加页数，A4纸双面打印。

三、表中所涉及的签名都必须用蓝、黑色墨水笔，亲笔签名或签字章，不可以打印代替。

四、同行专家业内评价意见书编号由工程师学院填写，编号规则为：年份4位+申报工程师职称专业类别(领域)4位+流水号3位，共11位。

## 一、个人申报

(一) 基本情况【围绕《浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）工程类专业学位研究生工程师职称评审参考指标》，结合该专业类别(领域)工程师职称评审相关标准，举例说明】

### 1. 对本专业基础理论知识和专业技术知识掌握情况(不少于200字)

在智慧能源和空调热舒适领域，我系统地掌握了热舒适模型的理论基础，理解了评估人体热舒适度的各类指标及其应用，并撰写了一篇综述论文。积累了数据收集、数据清洗和使用统计软件进行数据分析的经验。我学会了使用YOLOv5模型和图像分割技术来处理热图像，并掌握了常用的机器学习算法以及能够对所用算法进行超参数调优。此外，通过文献阅读和对实验数据的分析，我了解到生理参数（如心率变异性、皮肤温度）和环境参数（如温度、湿度、太阳辐射）之间的关系及其对人体热感觉和热舒适的影响。在工程实践和科研过程中，我熟练运用Python、Matlab等编程语言和工具进行数据分析、算法开发及仿真建模。

### 2. 工程实践的经历(不少于200字)

在工程实践方面，我积极参与学校和企业的重点研发项目，积累了丰富的工程经验，并在移动电源热设计、红外图像处理、机器学习算法应用等方向形成了系统性的实践能力。

参与的项目包括：

[1] 2023. 7-2024. 8, 车内热舒适环境智能判定, 制冷系统工程师。

[2] 2022. 09-2025. 6, 基于机器学习的汽车乘坐舱热舒适模型建立与应用, 课题负责人。

这些工程实践经历不仅提升了我的技术能力，也增强了我在复杂工程环境中的团队协作与项目管理能力。

### 3. 在实际工作中综合运用所学知识解决复杂工程问题的案例(不少于1000字)

针对传统的车内热舒适模型存在的实验场地受限、建模参数难以获取、未对人群进行区分等问题，基于机器学习方法构建了各季节驾驶员和乘员在真实驾驶状态下的车内热感觉和热舒适模型。研究旨在提高汽车乘坐舱内热环境评价模型的准确性和实用性，对于实现汽车乘坐舱热环境的科学管理，建立舒适且节能的车内热环境，具有至关重要的意义。

首先，梳理影响人体热舒适的关键因素，在实践过程中，我在深圳开展了春季、夏季和冬季三个季节的真实驾驶条件下的热舒适实验，采集环境参数、生理参数和主观问卷数据，建立了包含87名志愿者的1170组有效数据的热舒适数据集。在数据采集中，采用YOLOv5目标检测算法、Canny边缘检测算法并结合形态学运算，自动提取受试者的全脸皮肤温度。基于实验数据，系统分析了环境因素、生理因素和个体差异对车内人体热感觉与热舒适的影响。

其次，采用了多种机器学习算法进行对比与优化，最终选择支持向量机算法来建立整体热感觉和整体热舒适模型。研究发现，综合考虑环境参数、生理参数、个体参数和修正后的代谢率，会使模型预测精度显著提升，各季节的整体热感觉预测准确率分别达到70.27%、70%、75.61%，RMSE均小于0.62，在

±1误差线内的预测准确率达到97.5%以上。进一步引入由问卷得到的局部热感觉数据后，各季节的整体热感觉模型的预测准确率可提升至75.68%~87.81%。考虑整体热感觉和局部热舒适后，各季节的整体热舒适模型的预测准确率可达77%以上。此外，建立了基于热环境特征的热舒适评价体系。

最后，在杭州地区开展了秋季实际驾驶验证实验，证明本研究所建立的SVM模型泛化性和适用性较PMV模型有显著提高。应用迁移学习方法进一步增强了模型在新地区、新季节的泛化能力，整体热感觉预测准确率提高8.52%，达到63.45%，RMSE为0.62，在

±1误差线内的预测准确率达到92%以上，证实了所建立的模型在跨地域、跨车型应用中的有效性。

此次研究项目通过创新性地应用技术手段，取得了一定的经济和社会效益。研究聚焦于房车内部的热舒适性问题，模型的开发不仅能提高房车内部热舒适性的评估精度，还能为企业在产品设计和改进中提供有价值的技术支持。通过准确预测不同季节和驾驶条件下的热舒适性，新建立的模型可以帮助企业改进房车空调系统的设计，使空调更精确地调节温度和湿度，通过实时监测和动态调整空调输出，避免过度冷却或加热，在提高车内的热舒适性的同时，尽可能地减少能源消耗。这不仅可以提升能源利用效率，还为消费者提供了更舒适的驾乘体验，从而提升品牌的市场竞争力。

**(二) 取得的业绩(代表作)【限填3项, 须提交证明原件(包括发表的论文、出版的著作、专利证书、获奖证书、科技项目立项文件或合同、企业证明等)供核实, 并提供复印件一份】**

**1. 公开成果代表作【论文发表、专利成果、软件著作权、标准规范与行业工法制定、著作编写、科技成果获奖、学位论文等】**

成果名称	成果类别 [含论文、授权专利(含发明专利申请)、软件著作权、标准、工法、著作、获奖、学位论文等]	发表时间/授权或申请时间等	刊物名称/专利授权或申请号等	本人排名/总人数	备注
热舒适模型与数据处理方法研究进展	核心期刊	2024年07月29日	能源工程	1/3	录用

**2. 其他代表作【主持或参与的课题研究项目、科技成果应用转化推广、企业技术难题解决方案、自主研发设计的产品或样机、技术报告、设计图纸、软课题研究报告、可行性研究报告、规划设计方案、施工或调试报告、工程实验、技术培训教材、推动行业发展中发挥的作用及取得的经济社会效益等】**

<b>(三) 在校期间课程、专业实践训练及学位论文相关情况</b>	
课程成绩情况	按课程学分核算的平均成绩： 89 分
专业实践训练时间及考核情况(具有三年及以上工作经历的不作要求)	累计时间： 1.1 年（要求1年及以上） 考核成绩： 84 分
<b>本人承诺</b>	
<p>个人声明：本人上述所填资料均为真实有效，如有虚假，愿承担一切责任，特此声明！</p> <p style="text-align: right;">申报人签名： 王佳</p>	



浙江大学研究生院  
攻读硕士学位研究生成绩单

学号: 22260169	姓名: 王佳	性别: 女	学院: 工程师学院	专业: 能源动力	学制: 2.5年						
毕业时最低应获: 26.0学分		已获得: 30.0学分		入学年月: 2022-09	毕业年月:						
学位证书号:			毕业证书号:			授予学位:					
学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质	学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质
2022-2023学年秋季学期	智慧能源工程案例分析		2.0	92	专业学位课	2022-2023学年冬季学期	物联网操作系统与边缘计算		2.0	91	专业选修课
2022-2023学年秋季学期	新时代中国特色社会主义思想理论与实践		2.0	90	公共学位课	2022-2023学年春季学期	数学建模		2.0	92	专业选修课
2022-2023学年秋季学期	工程技术创新前沿		1.5	90	专业学位课	2022-2023学年夏季学期	自然辩证法概论		1.0	88	公共学位课
2022-2023学年秋冬学期	工程管理		2.0	85	跨专业课	2022-2023学年春夏学期	高阶工程认知实践		3.0	88	专业学位课
2022-2023学年秋冬学期	工程伦理		2.0	96	公共学位课	2022-2023学年夏季学期	“四史”专题		1.0	96	公共选修课
2022-2023学年冬季学期	综合能源系统集成优化		2.0	89	专业选修课	2023-2024学年夏季学期	研究生英语		2.0	免修	公共学位课
2022-2023学年秋冬学期	研究生论文写作指导		1.0	77	专业学位课	2023-2024学年夏季学期	研究生英语基础技能		1.0	免修	公共学位课
2022-2023学年冬季学期	智慧能源系统工程		2.0	92	专业学位课		硕士生读书报告		2.0	通过	
2022-2023学年冬季学期	产业技术发展前沿		1.5	96	专业学位课						

说明: 1. 研究生课程按三种方法计分: 百分制, 两级制 (通过、不通过), 五级制 (优、良、中、及格、不及格)。  
2. 备注中“\*”表示重修课程。

学院成绩校核章:

成绩校核人: 张梦依

打印日期: 2025-06-03



## 稿件录用通知

王佳、陈畴旭、徐象国：

《热舒适模型与数据处理方法研究进展》一文，已通过审阅，并办理了相关录用手续。《能源工程》是国内外公开发行的能源类科技期刊，国际标准连续出版物号 ISSN1004-3950、中国标准连续出版物号 CN33-1113 / TK，双月刊。《能源工程》是中国期刊全文数据库收录期刊、中国学术期刊评价数据库统计源期刊、中国核心期刊（遴选）数据库收录期刊、中文科技期刊数据库收录期刊、中国学术期刊（光盘版）收录期刊。

本通知和稿件录用证明具有同等效力。

《能源工程》编辑部  
2024年7月29日



地址：杭州市余杭塘路 2159-1 号浙能创业大厦 C 座  
电话：0571-86605782

邮编：311121

欢迎引用本刊文章

# 热舒适模型与数据处理方法研究进展

王佳<sup>1,3</sup>, 陈畴旭<sup>1</sup>, 徐象国<sup>1,2</sup>

- 浙江大学制冷与低温研究所 浙江省制冷与低温技术重点实验室, 浙江 杭州 310027;
- 浙江大学平衡建筑研究中心, 浙江 杭州 310027;
- 浙江大学工程师学院, 浙江 杭州 310027)

## Research Progress on Thermal Comfort Indices and Data Processing Methods

WANG Jia<sup>1,3</sup>, CHEN Chouxu<sup>1</sup>, XU Xiangguo<sup>1,2</sup>

- Institute of Refrigeration and Cryogenics, Key Laboratory of Refrigeration and Cryogenic Technology of Zhejiang Province, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, China;
- Center for Balance Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, China;
- Polytechnic Institute, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, China)

中图分类号: TU831 文献标识码: A

**摘要:** 适宜的热环境有助于人体健康和城市发展。热舒适模型是评价热环境对人体舒适度影响的重要因素。通过系统总结现有的热舒适模型和数据处理方法,可以帮助研究者选择合适的热舒适模型和研究方法,提高热环境评估的科学性和实用性。本文从传热模型和经验模型两方面介绍热舒适模型的研究进展,根据应用环境不同,将传热模型分为均匀稳态传热模型、均匀瞬态传热模型、非均匀稳态传热模型和非均匀瞬态传热模型,对各类模型进行对比和总结,并分析热舒适实验的数据收集和处理方法,汇总中国部分城市的常见室外热舒适指标中性范围,最后探讨热舒适模型与数据处理方法未来的发展方向。

**关键词:** 热舒适模型; 数据收集; 数据处理

**ABSTRACT:** A suitable thermal environment contributes to human health and urban development. Thermal comfort models are important factors to measure the impact of thermal environment on human comfort. A systematic summary of existing thermal comfort evaluation models and data processing methods can help researchers choose appropriate thermal comfort models and research methods, and improve the scientific and practicality of thermal environment assessment. This paper introduces the research progress of thermal comfort models from two aspects: heat transfer model and empirical model, classifies the heat transfer model into uniform steady state heat transfer model, uniform transient heat transfer model, non-uniform steady state heat transfer model and non-uniform transient heat transfer model according to the different application environments, compares and summarizes the indices. We also analyze the data collection and processing methods of thermal comfort experiments, summarize the neutral range of common outdoor thermal comfort indices in some Chinese cities, and finally discuss the future development direction of thermal comfort models and data processing methods.

**KEY WORDS:** thermal comfort model; data collection; data processing

引用本文格式: (本段作者勿动) 作者姓名. 中文标题[J]. 能源工程, 年, 卷(期): 起始页码-终止页码. 作者姓名. 英文标题[J]. Energy Engineering, 年, 卷(期): 起始页码-终止页码.

## 0 引言

随着人们对生活品质的追求日益增强,对人体舒适度的研究变得尤为重要。热舒适指标用于

评估热环境对人体舒适度的影响,是人们居住、工作、出行和娱乐等环境的设计的重要参考因素。人们一天的大部分时间都处于室内,适宜的热环境有助于提高室内人员的满意度和工作效率<sup>[1]</sup>。近年来,随着人们健康意识的增强,越来越多的人利用空闲时间到室外进行活动,但全球气候变暖和快速城市化加剧了城市热岛效应,导致城市

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2022FZZX01-09); 浙江大学平衡建筑研究中心自主立项科研项目(K横 20223302); 浙江省公益技术研究项目(LGF22E080022)

居民在室外活动时的热舒适度急剧降低<sup>[2]</sup>。而在出行方面，随着汽车保有量逐年增长，人们花费在车内的时间大幅增加，舒适的乘坐舱热环境可以缓解车内人员的疲劳，使驾驶员能够集中注意力、保证行车安全<sup>[3]</sup>。可以看出，热舒适对人类健康状况、生产效率、生活质量及社会活动具有重要影响。

美国供暖制冷空调工程师学会（ASHRAE）将热舒适定义为人体对热环境的满意状态。热舒适是人的主观感受，无法直接测量，在对其进行评估时，需要将一些环境因素（如温度）和生理因素（如皮肤温度）转化为这种主观感受。在这一转化过程中，会存在测量参数不准确、建立的模型过于简化、受地理因素影响大等问题，建立合适的模型对热舒适的评估与预测至关重要。

热舒适指标是指用来量化和评估特定热环境下人体舒适度的具体数值或标准，通常基于热舒适模型中的方程和算法计算得出。由于影响热舒适的因素复杂多样，导致在不同的关注点下，会有差异化很大的指标来衡量不同场景中的热舒适，通过分析和总结这些指标对应的模型可以帮助研究人员选择合适的热舒适评估模型和方法。Freitas等<sup>[4]</sup>在2017年对全球范围内已开发的165个热指数进行了统计、分类和评估，但没有对常见热舒适模型发展与修正进行归纳。Katić等<sup>[5]</sup>主要介绍了从简单到复杂的热生理模型及其应用，但未系统介绍这些热生理模型所对应的热舒适模型。吴清清等<sup>[6]</sup>以热空间模型、热生理模型和热心理模型为分类依据，对非对称热环境下的人体热舒适度研究进行了综述，但没有考虑其他热环境下的热舒适模型。Coccolo等<sup>[7]</sup>则侧重于总结常用的室外热舒适模型的物理方程。综合上述分析，现有综述尚未系统地总结不同热环境下常见热舒适模型的发展与修正情况。此外，鉴于对模型精确度要求的提高，近几年，一些热舒适研究提出基于机器学习的新模型，而上述综述中并未涉及。

相比于已有综述，本文结合近年来与热舒适有关的研究，根据应用环境的不同对热舒适模型进行分类，系统介绍传热模型和经验模型的发展和修正，对比和总结各模型所涉及的环境和生理

参数以及实际应用。另外，在建立热舒适模型时，需要对主观信息、环境和生理参数进行收集与处理，本文同时总结热舒适研究过程中的关键参数的收集和处理方法，为未来热舒适研究提供参考。

## 1 热舒适模型研究进展

热舒适要求人体产热和散热达到平衡，且有适当的体温和排汗率<sup>[8]</sup>。当外部因素变化影响这一平衡时，人体会产生不适感，并利用自身调节机能，如通过皮肤血管收缩与舒张、颤抖和出汗来调整散热，此时人体的核心温度和皮肤温度会发生变化。生理学家通常认为，只有最大限度地减少体温调节的努力，才能达到最佳的热舒适<sup>[9]</sup>。

根据建模是否考虑传热过程，可将热舒适模型分为传热模型和经验模型。传热模型是结合传热方程和热生理模型提出的，其能量平衡方程见式（1）。经验模型则包含基于大量历史数据和观测结果通过统计或机器学习建立的热舒适模型。

$$M - W = C + R + E_{sk} + C_{res} + E_{res} + S_{sk} + S_{cr} \quad (1)$$

式中： $M$ 为人体代谢率； $W$ 为机械功完成率； $C$ 、 $R$ 、 $E_{sk}$ 分别为皮肤表面对流热损失、辐射热损失、蒸发热损失； $C_{res}$ 、 $E_{res}$ 分别为呼吸对流热损失、蒸发热损失； $S_{sk}$ 为皮肤储热率； $S_{cr}$ 为核心储热率。方程中的每一项单位均为 $W/m^2$ 。

根据环境参数在时间和空间上的不同可将传热模型分为四类，分别为均匀稳态传热模型、均匀瞬态传热模型、非均匀稳态传热模型、非均匀瞬态传热模型。均匀是指空间上环境参数的均匀性，稳态是指环境参数在时间上不发生改变。例如，理想化的室内空调环境可视为均匀稳态环境；而由于房间布局、窗户位置、人员活动等因素的影响，真实室内空调环境往往呈现为非均匀稳态环境；对于大部分车内和室外环境，其环境参数在时间和空间上波动较大，可将其视为非均匀瞬态环境。由于建筑与汽车在材料和内部构造等方面显著不同，而室外环境没有围护结构，环境参数相比于室内和车内变化更为剧烈，研究者建立室内、室外、车内的热舒适模型所需要的实验环境和模型输入参数往往存在差异，本文根据建模是否考虑传热过程以及环境的稳定性和均

匀性对不同场所的热舒适模型进行归类 and 总结。

### 1.1 均匀稳态传热模型

一些研究人员将室内或室外环境简化为理想的均匀稳态环境来建立热舒适模型,应用较多的热舒适模型有预测平均评价(PMV)、标准有效温度(SET\*)、生理等效温度(PET)和通用热气候指数(UTCI)。其中,SET\*、PET和UTCI均为等效温度模型。

PMV模型由Fanger在1970年提出,最初是针对室内热环境设计的,代表人体热平衡对中性的偏离程度,被广泛用于评价室内人体热舒适并作为空调设计依据<sup>[10]</sup>。一些研究指出,PMV在夏季直接应用于室外会高估人体热感觉,即显示人们觉得更热,其原因可能是人们在室外的热适应能力可能与室内不同,在室外更容易接受更宽的温度范围。此外,PMV为单节点模型,对全身采用相同的计算方程,并未考虑不同身体部位对热环境敏感程度的不同,对于不均匀环境的热舒适性分析具有较大的局限性。PMV模型的发展与修正如表1所示。

表1 PMV模型的发展与修正

来源	发展与修正
Fanger, 1970 <sup>[10]</sup>	提出PMV模型
Jendritzky等, 1981 <sup>[11]</sup>	对PMV的室外热辐射计算进行了修正
Fanger等, 2002 <sup>[12]</sup>	提出ePMV模型,引入期望因素,量化了人们对温度感知的预期影响
钱炜等, 2002 <sup>[13]</sup>	在PMV理论上推导出室外热环境舒适性评价模型OTCD
Yao Runming等, 2009 <sup>[14]</sup>	提出aPMV模型,使用适应性系数来代表影响热舒适感的适应性因素
Gilani等, 2016 <sup>[15]</sup>	使用可测量参数平均动脉血压(MAP)替代活动水平,修正PMV模型
Zhang Sheng等, 2020 <sup>[16]</sup>	使用标准有效温度模型的皮肤温度取代简化的皮肤温度,修正PMV模型
Zhang Sheng等, 2021 <sup>[17]</sup>	使用标准有效温度模型的皮肤湿润度来计算皮肤蒸发热损失,修正PMV模型
Zhang Sheng等, 2021 <sup>[18]</sup>	对ePMV模型进行修正,通过增加热中和系数,减小热中性附近的预测偏差

Gagge等在1972年提出基于二节点模型的SET,在后续的研究中对其进行改进,并更新命名为新标准有效温度SET\*。早期SET的标准环境参数的设置是固定的,难以真实反映与实际环境等效的热状态。目前使用最广泛的为1986年版本的SET\*,引入了标准服装热阻和标准风速随代谢率变化的公式<sup>[19]</sup>,其定义为:一个穿着与活

动水平相匹配的标准服装的人,在假想的、相对湿度为50%,且空气温度与平均辐射温度相同的等温环境中,达到与实际环境同样的皮肤散热量和皮肤湿润度所需的空气温度<sup>[20]</sup>。

相比于PMV模型将人作为整体进行研究,SET\*模型将人体分为核心层与皮肤层,核心层产生的热量通过血液传至皮肤层,皮肤再通过身体表面的服装或直接与外界进行热交换,在反映人体热生理调节过程及换热计算方面有较高的准确性,被广泛应用于室内和室外热舒适研究。但有研究指出,SET\*在计算过程中忽略了呼吸散热的影响,而在较高的新陈代谢率下,呼吸散热不容忽视。SET\*模型的发展与修正如表2所示。

表2 SET\*模型的发展与修正

来源	发展与修正
Gagge等, 1972 <sup>[21]</sup>	提出SET模型
Gagge等, 1986 <sup>[20]</sup>	提出新标准有效温度SET*,扩展SET适用范围,给出标准服装和标准风速的计算方法
Pickup等, 2000 <sup>[22]</sup>	引入室外平均辐射温度(OUT_MRT)模型并建立室外标准有效温度(OUT_SET*)
Li Beizhi等, 2018 <sup>[23]</sup>	提出湿度修正系数eRH,以修正在不同相对湿度下SET*的偏差
Du Heng等, 2019 <sup>[24]</sup>	提出修正系数M,用于解释SET*模型中的偏差,尤其是提高了高代谢率区域的预测精度
Ji Wenjie等, 2022 <sup>[19]</sup>	对换热系数计算方法及相关参数取值进行统一,给出可靠的计算SET*的MATLAB程序
Liu Jie等, 2023 <sup>[25]</sup>	提出扩展平均皮肤温度指数(EMSTI),建立标准与实际环境的等效关系,对湿热地区的SET*进行修正

Höppe在1999年提出基于慕尼黑能量平衡模型(MEMI)的PET。MEMI是基于人体能量平衡方程和Gagge二节点模型的部分参数建立的,与二节点模型区别在于生理出汗率的计算方式不同以及考虑了从皮肤表面到服装外表面的传热过程。PET的定义为:一个进行轻度活动(代谢率为80W)、着装0.9clo的人,在风速为0.1m/s、水蒸气分压力为12hPa(相当于20°C的空气温度下相对湿度为50%)的等温室内环境中,达到与实际环境相同的热平衡状态所需的空气温度<sup>[26]</sup>。由于综合考虑环境和人体参数以及传热过程,PET在评估室外冷热、天气预报、城市设计等方面应用广泛。但PET使用的服装热阻为固定值且在模拟皮肤热流通量方面存在局限性,其发展与修正如表3所示。

表3 PET模型的发展与修正

来源	发展与修正
Höppe, 1999 <sup>[26]</sup>	提出 PET 模型
Chen Yungchang 等, 2018 <sup>[27]</sup>	提出 mPET 模型, 使用多层服装模型和多段身体模型, 能更好地适应炎热和潮湿地区
Yu Yichen 等, 2020 <sup>[28]</sup>	考虑风速和湍流强度的影响, 使对流换热系数适应于室外环境, 提高计算 PET 对流热损失项的准确性

由于不同学科对基于生理反应的室外气候评估指数需求增加, 专家提议新指数应整合热生理学和生物物理学知识, 并基于人体体温调节多节点模型开发出 UTCI<sup>[29]</sup>。相比于 SET\* 和 PET, UTCI 将人体划分为多个节点, 模型更复杂, 且考虑了人体的生理热反应, 如颤抖、出汗、血流量, 其定义为: 一个步行速度为 4km/h、新陈代谢率为 135W/m<sup>2</sup> 的人, 在平均辐射温度等于空气温度, 相对湿度为 50% (空气温度小于或等于 29°C) 或水蒸气压小于 2kPa (空气温度大于 29°C), 地面以上 10m 处的风速为 0.5m/s 的参考环境中, 达到与实际环境下同样的动态生理热反应所需的空气温度<sup>[30]</sup>。虽然 UTCI 的推导过程考虑了人体的局部皮肤温度和不同时段平均动态热响应, 但实验是在均匀稳态环境下进行的, 计算时只考虑了一个空气温度, 而不是非均匀环境下人体各个部位附近的空气温度, 且动态环境因素与 UTCI 之间的实际关系尚不清楚, 故将 UTCI 归类为均匀稳态传热模型。UTCI 考虑多种气象和生理参数, 在广泛的气候条件中得到验证, 可应用于城市规划、体育和休闲活动等领域。

### 1.2 均匀瞬态传热模型

考虑到人员走动和环境动态变化, Bruse<sup>[31]</sup> 利用集成动态微尺度生物气象模型系统来评估室外热舒适, 该系统包含 ENVI-met 模型和 dPET 模型。ENVI-met 是微尺度气候模型, 提供每个点在每个时段的气候信息, 如风速、气温、辐射温度。dPET 是基于二节点模型和慕尼黑能量平衡模型的动态生物气象模型, 通过与 ENVI-met 耦合, 获取每个地点动态变化的环境参数, 模拟“虚拟行人”的传热过程, 计算环境变化对人体热平衡的影响, 包括皮肤温度和核心温度的变化, 来评估人体在不断变化的外部条件下的热舒适度。

此外, 由于 UTCI 在估算太阳和风条件及其

变化对热舒适影响方面存在局限性, Li Jianong 等<sup>[32]</sup> 考虑太阳和风条件的混合变化及变化频率, 将动态热环境量化为整体微气候环境中频繁的阶跃变化, 并将频率作为评价因子, 对 UTCI 进行修正, 提出 UTCI\* 模型, 用于评估频繁阶跃变化的热环境。

### 1.3 非均匀稳态传热模型

受空间结构、空气流动等影响, 人体周围的热环境通常是不均匀的, 这些不均匀性会导致人体不同部位的热交换速率不同。对于车内环境, 使用较多的非均匀稳态传热模型有当量均匀温度 (EHT) 和当量温度 (EQT), 两者均为等效温度模型。

EHT 将人体划分为 15 个节段, 设定一个理想均匀环境, 非均匀环境下某一身体节段的散热量与其在该均匀环境下的散热量相等时, 均匀环境下的空气温度为非均匀环境的 EHT, 散热量包含辐射换热量、对流换热量、人体太阳辐射得热量<sup>[33]</sup>。使用 Wyon 提出的 EHT 热舒适范围图可以预测身体不同部位的热舒适性, Nilsson 在此基础上针对不同的服装热阻对热舒适区进行改进<sup>[34]</sup>。

EQT 则直接令感受器的热损率等于辐射换热量、对流换热量以及人体太阳辐射得热量之和, 从而求得当量温度  $t_{eq}$ <sup>[35]</sup>。得到某节段的等效温度, 可根据 ISO 14505 标准给出的热舒适范围图来判断身体某部位的舒适情况。尽管 EHT 和 EQT 所计算出的当量温度值不同, 有文献通过实验得出两者评价效果一致, 且都仅针对稳态环境<sup>[8]</sup>。

针对室内环境, Su Xiaowen 等<sup>[36]</sup> 等开发了一种新的  $t_{eq}$  舒适度图来评价不均匀的建筑环境, 并将其与 ISO 14505 标准给出的汽车舒适度图进行了比较, 发现建筑与车辆的舒适度存在显著差异。

### 1.4 非均匀瞬态传热模型

人体真实所处的环境往往是非均匀且瞬态的, 在该环境中使用较多的有基于 Fiala 多节点模型的动态热感觉 (DTS) 模型和伯克利 (UCB) 模型。和 PMV 类似, DTS 模型使用了大量室内的实验数据来建模。作者通过对实验数据回归分析得到由皮肤温度、核心温度和皮肤温度变化率计算整体动态热感觉的公式, 该模型应用范围广

泛, 活动水平的适应范围为 1met-10met<sup>[37]</sup>。

UCB 模型使用了大量车内的稳态和瞬态实验数据, 包含局部热感觉模型、局部热舒适模型、整体热感觉模型和整体热舒适模型, 涉及局部皮肤和核心温度及其变化率, 能够预测不均匀瞬态环境下身体各部位和全身的热舒适性, 并通过了德尔福风洞实验的验证<sup>[38]</sup>。但 UCB 模型受到系数太多的限制, 且着重于温暖环境中的冷却效应, 对寒冷环境下的加热效应关注较少。

周晓洁对瞬态环境下的车内实验数据进行线性回归得到 TSV 关于人脸热负荷、平均皮肤温度的计算公式, 再通过对实验数据进行分析发现, 可以使用人脸处突变热负荷的变化来表示太阳辐射变化带来的人体热感觉变化, 得到最终的热感觉计算公式<sup>[39]</sup>。相比于 UCB 模型, 周晓洁的模型考虑了汽车的驾驶状态以及太阳辐射突变引起的驾驶员热负荷变化。

对于室外环境, Lai Dayi 等<sup>[40]</sup>等参照室内动态热感觉模型研究方法, 在 Fiala 模型的基础上, 考虑热负荷、平均皮肤温度及其变化率, 建立了动态整体热舒适 (OTC) 模型。Geng Jing 等<sup>[41]</sup>考虑了皮肤温度角度变化的敏感性以及高温对人体体温调节和生理反应的影响, 为非对称高温环境下的室外活动提供了一种多段人体生物热模型。

### 1.5 经验模型

对于室外环境, 存在一些经验模型, 其中, 风冷却指数 (WCI) 适用于冷环境; 湿球黑球温度 (WBGT) 适用于热环境; 新有效温度 (ET\*)、全球室外热舒适指数 (GOCl) 可同时用于冷热环境。专门针对某一地区的经验模型有地中海室外舒适指数 (MOCI)、北京室外舒适指数 (BOCI)、西安室外热舒适指数 (XOCI) 等。

近年来, 随着人工智能领域的快速发展, 机器学习被应用于热舒适性研究。相比于传统经验模型, 这些研究使用了先进的算法, 输入的参数通常更系统全面, 通过实现输入和输出的高度匹配, 大幅提升预测精度, 主要的算法有人工神经网络、支持向量机、随机森林和神经网络、线性判别分析等。

目前, 大多数基于机器学习的热舒适研究是在室内环境进行的。比如, Li Kangji 等<sup>[42]</sup>同时测量腕部皮肤温度、血压、心率、心率变异性、皮肤电导、血氧饱和度六种生理信息, 设计了基于多种生理信息的数据驱动热感觉预测的 ANN 模型, 由于考虑到不同生理参数之间的相关性及相互作用, 其准确度优于基于皮肤温度的预测模型和 PMV 模型。Jiang Lai 等<sup>[43]</sup>将代谢率、服装热阻、空气温度、相对湿度、空气速度、辐射温度考虑在内, 开发了基于支持向量分类算法的个人热感觉建模方法。Liu Shichao 等<sup>[44]</sup>测量皮肤温度、心率、空气温度和相对湿度, 使用 14 种不同的机器学习算法来预测受试者的热偏好, 其中随机森林算法的预测精度最高, 显著高于 PMV 模型的预测精度。

在车内用机器学习的方法来建立热舒适模型的研究较少。杨洁<sup>[45]</sup>将身体各部位的基本代谢率、服装热阻及其附近的环境参数作为输入, 提出 SVM 季节分类热舒适模型。

对于室外环境, Liu Kuixing 等<sup>[46]</sup>以实验获得的局部皮肤温度和热负荷为输入, 建立了基于支持向量机分类器的室外热状态预测分层模型 (HMOTSP), 并通过比较不同输入组合的预测精度, 识别出预测室外热状态的最佳输入特征。Chan Sin Yi 等<sup>[47]</sup>建立了人工神经网络模型, 通过输入包含环境参数、个人特征、小气候感知、环境特征感知的 17 个变量来预测香港城市公园夏季和冬季的热舒适。Xu Tiantian 等<sup>[48]</sup>采用多元非线性回归的方法基于下臂皮肤温度、下臂皮肤温度变化率、核心温度建立了动态室外热感觉模型。

此外, 还有研究使用数字孪生技术, 利用计算机视觉和图形模型预测室外热舒适。例如, Liu Pengyuan 等<sup>[49]</sup>基于众包数据和计算机视觉的地理空间人工智能框架, 采用 GraphSAGE-LSTM 算法, 预测人行道上的人类舒适度, 所提出的模型的准确率比随机森林模型、LSTM 和 Build2Vec 的深度学习框架高 20% 以上。

## 2 热舒适模型比较与总结

表 4 按时间顺序对常见热舒适模型的来源、

建模所涉及的气象和人体参数进行了汇总。从表中可以看出，热舒适模型的研究趋势体现出从关注基础环境参数向综合考虑复杂气候条件以及人体热生理反应的转变。早期的研究主要围绕环境温度、湿度、风速进行，随后逐步引入太阳辐射

等更复杂的气候条件，并关注人体与环境的交互作用，考虑人体皮肤温度、心率等参数。建模所用的人体参数从整体过渡到身体各节段，并开始考虑生理参数的变化率，模型所适用的环境逐渐从均匀、稳态转变为非均匀、瞬态。

表 4 常见热舒适模型汇总

分类	模型	单位	提出者	时间	环境参数	人体参数
均匀稳态传热模型	预测平均评价 PMV <sup>[10]</sup>		Fanger	1970	$T_a, T_r, V, RH$	$M, I_{cl}$
	标准有效温度 SET* <sup>[20]</sup>	°C	Gagge 等	1986	$T_a, T_r, V, RH$	$M, I_{cl}, T_{sk}, W$
	生理等效温度 PET <sup>[26]</sup>	°C	Höppe	1999	$T_a, T_r, V, RH$	$M, I_{cl}, T_{sk}, T_{core}$
均匀瞬态传热模型	动态生理等效温度 dPET <sup>[31]</sup>	°C	Bruse	2000	$T_a, T_r, V, RH, V_p$	$M, I_{cl}, T_{sk}, T_{core}$
	通用热气候指数 UTCI <sup>[29]</sup>	°C	ISB	2009	$T_a, T_r, V, RH, V_p$	$M, I_{cl}, T_{sk}, T_{core}, W$
非均匀稳态传热模型	当量均匀温度 EHT <sup>[33]</sup>	°C	Wyon	1990	各节段 $T_a, T_r, V, T_b$	各节段 $M, I_{cl}, T_{sk}$
	当量温度 EQT <sup>[35]</sup>	°C	SAE J2234	2001	各节段 $T_a, T_r, V, T_b$	各节段 $T_{sk}$
非均匀瞬态传热模型	动态热感觉模型 DTS <sup>[37]</sup>		Fiala	1998		$T_{sk,m}, T_{core}, dT_{sk,m}/dt$
	UCB 模型 <sup>[38]</sup>		Zhang Hui 等	2009		各节段 $T_{sk}, T_{core}, dT_{sk}/dt, dT_{core}/dt$
	动态 OTC 模型 <sup>[40]</sup>		Lai Dayi 等	2017	$T_a, G, V, RH$	$M, I_{cl}, TL, T_{sk,m}, dT_{sk,m}/dt$
	Zhou's 模型 <sup>[39]</sup>		周晓洁	2020	$T_{out}$	$T_{sk,m}, TL_g(\text{face}), \Delta TL_g(\text{face})$
经验模型	有效温度 ET <sup>[50]</sup>	°C	Houghton 等	1923	$T_a, T_w, V$	$I_{cl}$
	风冷却指数 WCI <sup>[51]</sup>	kcal/m <sup>2</sup> ·h	Siple 等	1945	$T_a, V$	
	湿黑球温度 WBGT <sup>[52]</sup>	°C	Yaglou 等	1957	$T_a, T_w, T_g$	
	地中海室外舒适指数 MOCI <sup>[53]</sup>		Salata 等	2016	$T_{mnt}, V, RH$	$I_{cl}$
	全球室外热舒适指数 GOCI <sup>[54]</sup>		Golasi 等	2018	$T_a, T_{mnt}, T_M, T_m, V, RH$	
	北京、西安、哈密室外舒适指数 BOCI, XOCI, HOCI <sup>[55]</sup>		安乐	2021	$T_a, T_{mnt}, V, RH, T_g, G$	$M, I_{cl}$

注： $T_a$ 为人体所处环境的空气干球温度，°C； $RH$ 为相对湿度，%； $V$ 为风速，m/s； $T_w$ 为湿球温度，°C； $T_g$ 为黑球温度，°C； $T_{out}$ 为车外空气温度，°C； $w$ 为皮肤湿润度； $T_r$ 为平均辐射温度，°C； $M$ 为代谢率，W/m<sup>2</sup>； $I_{cl}$ 为服装热阻，clo； $T_M$ 、 $T_m$ 分别为最热月、最冷月平均温度，°C； $G$ 为太阳辐射，W/m<sup>2</sup>； $T_{sk}$ 为皮肤温度，°C； $T_{sk,m}$ 为平均皮肤温度，°C； $T_{core}$ 为核心温度，°C； $T_b$ 为壁面温度，°C； $V_p$ 为水蒸气分压力，Pa； $TL$ 为热负荷，W； $TL_g(\text{face})$ 为渐变热负荷，W； $\Delta TL_g(\text{face})$ 为脸部突变热负荷的变化量，W； $dT_{sk}/dt$ 为皮肤温度变化率，°C/s； $dT_{core}/dt$ 为核心温度变化率，°C/s。通过机器学习得到的热舒适模型未列在表格中，其具体输入参数见 1.5 节的文字介绍。

由于各热舒适模型在输入参数、计算模型和实验场地等方面存在不同，各模型在适用范围和预测精度上存在差异。早期的经验模型考虑参数较少，且可能受地理和人群因素的制约，相对于传热模型，预测精度更低。但随着考虑的环境和人体参数更全面以及引入了纬度等地理因素，经验模型的预测精度逐渐变高。Golasi 等<sup>[54]</sup>在罗马进行现场实验调查，发现 GOCI 的总预测正确率高于 PMV、PET 和 UTCI，可以用来预测缺乏具体热舒适模型的地区的室外热舒适。而由于考虑了当地的气候、热感等因素，专门针对某一地区设计的 MOCI、BOCI、XOCI、HOCI 预测精度高于 GOCI<sup>[56]</sup>。机器学习模型的输入参数通常包含环境参数和生理参数，机器学习算法在热舒适领域的应用，大幅提高了热舒适模型在特定场所和

情景下的预测准确性。Pantavou 等<sup>[57]</sup>将人工神经网络、随机森林、支持向量机和线性判别分析四种机器学习算法与 PET 进行比较，发现四种机器学习算法的预测准确率都优于 PET。

关于传热模型，在室内环境使用较多的有 PMV 模型，该模型是基于大量室内主客观实验数据，结合人体热平衡方程，构成的包含六个基本变量的一般舒适性方程。相比于 SET\*、PET、UTCI、EHT、EQT 这些等效温度模型，PMV 的计算值可以直接评估室内人体的冷热状态，而无需参照热舒适范围图或表。EHT、EQT 和 UCB 模型在环境参数分布不均匀的车内环境应用较广。针对室外环境，研究人员往往会对比 PMV、PET、SET\*、UTCI 等常用传热模型的预测精度。受气候、地理位置等因素的影响，这些模型在不

同地区和不同季节的预测精度和适用情况不同。比如,冯锡文<sup>[58]</sup>对广州这一夏热冬暖地区的全年室外热舒适进行研究,分析了模型的偏好区间,认为PET的适用性最好;根据王澍<sup>[59]</sup>、Nie Ting<sup>[60]</sup>、雷永生<sup>[61]</sup>等的研究,可以总结出在严寒地区夏季时UTCI的预测精度最高,其余季节时PET的预测精度最高,且不推荐在寒冷和严寒地区冬季时使用UTCI来评估室外热舒适;朱悦宁<sup>[62]</sup>指出在重庆这一夏热冬冷地区夏季时UTCI相较于SET\*和PET的适用性更好。

### 3 数据收集与处理方法

#### 3.1 数据收集

对于室内热环境,大部分研究在真实建筑环境或环境参数可控的实验舱中收集数据。对于室外热环境,大部分研究采用横向实地调查来收集数据,该方法可以在真实环境中获得大量样本数据,能更好地代表整体,但难以控制活动、代谢、热史等,且只能收集每个受访者的一次数据,无法研究热环境的动态影响。另一部分研究在选定的或相对可控的室外热环境中,对选定的人群进行纵向测试来获取数据,这类研究可以选择或控制热环境参数和个人参数,也可以记录受试者的生理参数及其变化。对于车内热环境,很多关于热舒适的研究是在气候风洞进行的,通过控制车外风速、温度、湿度和太阳辐射强度,模拟各种室外工况,也有一些研究是在地下或室外停车场进行车内热舒适实验。由于风洞和停车场无法模拟车辆驾驶状态的动态场景,近年来,一些研究在真实驾驶情况下开展车内热舒适实验。如吴清清等<sup>[63]</sup>对汽车怠速和路试情况下乘坐舱制冷工况下的热环境和人体热舒适度进行了实验研究。

数据收集通常包括收集主观信息和测量数据。研究人员通常使用纸质或线上问卷获得主观信息,包含受试者的性别、年龄、热历史等基本信息以及热感觉投票(TSV)、热舒适投票(TCV)、热接受度投票(TAV)、热偏好投票(TPV)等主观评价。为方便数据传输和整合,也有一些研究使用在线Qualtrics调查工具<sup>[64]</sup>或开发手机软

件及数据管理系统<sup>[65]</sup>来收集人体主观信息。测量数据包含气温、风速、相对湿度、太阳辐射等环境参数以及心率、皮肤温度、代谢率等生理参数。环境参数可通过各类传感器测量或直接从当地气象站读取。生理参数的测量设备选择多样,可根据实际应用情况进行选择,如对于心率,可以使用心电图仪、智能手表或手环、智能胸带、智能戒指等接触式设备,也可以使用毫米波雷达等非接触式设备;对于皮肤温度,可以使用热电偶、含温度传感器的智能手表或手环等接触式设备以及热红外相机等非接触式设备。通过集成可穿戴设备的数据采集系统,可以方便后续的数据存储、分析、与软件组件的交互<sup>[66]</sup>。

#### 3.2 数据处理

对于收集的数据,一部分研究直接将热感觉投票或热舒适投票与测量得到的环境参数或生理参数进行多元回归分析,得出拟合公式,进而通过测量的参数来预测人体热感觉和热舒适。表5汇总了现有研究里中国部分城市的室外热感觉或热舒适回归模型。也有研究将收集到的数据进行相关性分析,选择合适的环境和生理参数作为输入参数,使用机器学习的方法来建立热舒适模型。

大部分研究将收集到的数据用于计算热舒适模型对应的评价指标。对于存在热感觉分级的指标,如PMV(-3~+3)、DTS(-3~+3)、OTC(-3~+3)、UCB(-4~+4),可直接用于评价人体的冷热状态。对于EHT和EQT,可以使用前文提到的热舒适范围图来判断人体各个部位的热舒适情况。而对于SET\*、PET、UTCI,可将热感觉投票与指标进行线性回归分析,得到含指标的热感觉预测公式,并根据公式计算得到指标的中性范围,对指标进行地区修正,中性范围一般指TSV或MTSV在 $\pm 0.5$ 内对应的指标范围;也有研究通过有序逻辑回归、多项式回归、probit回归等来确定上述指标的中性范围;部分研究使用热可接受范围和偏好温度来评价室外热舒适。表6总结了修正后的中国部分城市的SET\*、PET和UTCI的中性范围,为后续室外热舒适的研究提供一定的参考。

表5 中国部分地区室外热感觉或热舒适回归模型

地点	气候分区 <sup>[67]</sup>	季节	回归模型	范围
广州	夏热冬暖地区	夏	$ASV^* = -8.527 + 0.245 T_a + 0.013 RH - 0.457 V + 0.059 T_{mrt}$ <sup>[68]</sup> , $R=0.60$	-3~+3
		全年	$TSV = 0.193T_a - 0.377V + 0.013T_{mrt} + 0.136M - 4.376$ <sup>[58]</sup> , $R^2=0.60$	-4~+4
武汉	夏热冬冷地区	夏、秋	$TSV = -1.382 + 0.0643 T_a - 0.00376 RH - 0.161 V + 0.00076G$ <sup>[69]</sup> , $R=0.67$	-1~+1
合肥		秋、冬	$TSV = 0.12114T_a + 0.02886RH + 1.05036V + 0.00424G - 6.96478$ <sup>[70]</sup> , $R^2=0.76$ $TCV = 0.073T_a + 0.01705RH + 0.84691V + 0.002165G - 3.8977$ <sup>[70]</sup> , $R^2=0.63$	-4~+4 -3~+3
哈尔滨	严寒地区	冬	$OCV = 0.103T_a + 0.066RH - 0.136V + 0.00039G - 0.0225$ <sup>[71]</sup> , $R^2=0.94$	1~7

表6 中国部分地区 SET\*、PET、UTCI 中性范围修正汇总

数据处理	地点	气候分区 <sup>[67]</sup>	SET*中性范围/°C	PET 中性范围/°C	UTCI 中性范围/°C	
		初始值	22.2~26.5 <sup>[20]</sup>	18~23 <sup>[26]</sup> (欧洲)	9~26 <sup>[30]</sup>	
线性回归	广州	夏热冬暖地区	23.4~28.9 (全年) <sup>[58]</sup>	19.2~24.6 (全年) <sup>[58]</sup>	20.3~25.6 (全年) <sup>[58]</sup>	
	香港			19.0~23.0 (春、夏) <sup>[72]</sup>		
	台湾			26.0~30.0 (全年) <sup>[73]</sup>		
	重庆			22.2~28.1 (夏) <sup>[62]</sup>		
	上海	夏热冬冷地区	25.8~28.6 (夏) <sup>[74]</sup>	13.0~26.8 (夏、秋、冬) <sup>[75]</sup>	15.1~25.7 (春、夏、冬) <sup>[81]</sup> 7.9~26.7 (冬) <sup>[82]</sup>	
	长沙			15.0~22.0 (全年) <sup>[76]</sup>		
	南京			22.0~28.0 (夏) <sup>[77]</sup>		
	大连			16.1~24.4 (夏) <sup>[78]</sup>		
	西安	寒冷地区	10.9~19.3 (夏) <sup>[78]</sup>	12.4~26.9 (春、夏、冬) <sup>[79]</sup> 12.2~26.6 (夏、秋、冬) <sup>[80]</sup>	15.1~25.7 (春、夏、冬) <sup>[81]</sup> 7.9~26.7 (冬) <sup>[82]</sup>	
	天津			11.0~24.0 (全年) <sup>[83]</sup>	12.0~25.0 (全年) <sup>[83]</sup>	
	北京			19.2~29.0 (全年) <sup>[84]</sup>	8.7~25.4 (冬) <sup>[82]</sup>	
	哈密				1.5~11.3 (冬) <sup>[82]</sup>	
		哈尔滨	严寒地区	17~27 (全年) <sup>[85]</sup>	10~25 (全年) <sup>[85]</sup>	
	有序逻辑回归	天津	寒冷地区		9.0~25.0 (全年) <sup>[60]</sup>	11.0~25.0 (全年) <sup>[60]</sup>
probit 回归	广州	夏热冬暖地区	25.0~29.3 (全年) <sup>[58]</sup>	17.9~24.2 (全年) <sup>[58]</sup>	19.7~25.4 (全年) <sup>[58]</sup>	
	大连	寒冷地区	12.2~24.0 (夏) <sup>[78]</sup>	15.4~27.5 (夏) <sup>[78]</sup>	22.0~29.3 (夏) <sup>[78]</sup>	
	哈尔滨	严寒地区		13.0~20.0 (夏、秋、冬) <sup>[86]</sup> 10.3~25.3 (全年) <sup>[87]</sup>	10.4~25.2 (全年) <sup>[87]</sup>	

#### 4 总结与展望

本文从传热模型和经验模型两方面总结了不同热环境下热舒适模型的研究进展，对常见模型进行了对比分析，介绍了数据收集地点、内容和设备等以及数据处理方法，归纳了中国部分地区室外热感觉或热舒适回归模型以及 SET\*、PET、UTCI 修正后的中性范围，为热舒适评估和研究提供参考。

近年来热舒适研究取得了显著进步，但仍然存在一定的局限性，未来可从以下几个方面开展研究：(1) 在大数据和人工智能技术快速发展的背景下，充分利用更先进的机器学习技术，提高热舒适评价模型的准确性。(2) 针对不同气候区的人群对微气候的舒适度反应不同，可以在相同气候条件及文化背景的地区建立通用的热舒适评

价模型，形成规范统一的热舒适评价模型。(3) 建立标准化的气候监测方法与调查问卷，以提高热舒适评价结果的可比性，减少试验结果误差。

(4) 现有模型的研究数据获取困难，大部分研究在测量生理数据时需佩戴各类传感器，具有侵入性且对受试者活动干扰大，未来可以考虑研究和先进的非接触式设备来进行热舒适实验。

#### 参考文献

- [1] MAMULOVA E, LOOMANS M, LOONEN R, et al. Let's talk scalability: The current status of multi-domain thermal comfort models as support tools for the design of office buildings[J]. Building and Environment, 2023: 110502.
- [2] ELNABAWI M H, HAMZA N. Behavioural Perspectives of Outdoor Thermal Comfort in Urban Areas: A Critical Review[J]. Atmosphere, 2019, 11(1):