



建筑的气候响应机制与低能耗建筑设计原理

杨柳^{1,2*}

1. 绿色建筑全国重点实验室, 西安 710055;
2. 西安建筑科技大学建筑学院, 西安 710055

* E-mail: yangliu@xauat.edu.cn

收稿日期: 2023-04-03; 接受日期: 2023-08-01; 网络版发表日期: 2023-10-10

国家杰出青年科学基金(批准号: 51325803)、国家自然科学基金(批准号: 51838011)和国家重点研发计划(编号: 2018YFC0704500)资助项目

摘要 建筑对气候的有效响应(working with climate)是实现低能耗甚至零能耗建筑的本质属性,但在现代建筑设计理论与实践,普遍存在“盲区”。现代建筑依靠采暖通风与空调系统获得高品质的室内舒适环境,不仅运行能耗高、成本高,而且对自然气候资源的利用度很低、地域特征不鲜明。大量实地测试表明,传统地域建筑具有“冬暖夏凉”、低能耗运行的基本属性,但其适应气候的科学原理与机理鲜见论述,致使其节能技术经验在现代设计中传承不足。探索和挖掘传统建筑的气候适应机理、形成适应地域气候的建筑节能设计理论与方法是设计建造低能耗建筑、传承提升地域建筑生态经验、实现“新地域建筑”的根本途径。本研究综合运用建筑学、气候学以及建筑环境科学原理,从传统地域建筑中蕴含的人、建筑空间与气候动态变化之间的相互作用关系入手,通过在全国气候区开展大范围、多对象的现场实测、实验与理论分析、工程示范验证与标准推广,探索人对自然气候与建筑环境的适应过程、建筑对气候的响应机制,提出了运用建筑设计手法调控室内微气候的关键设计指标和参数,获得了人处于自然调控环境的临界区间规律,进而以此为基础,建立了综合运用建筑围护结构及其围合空间设计来动态响应气候周期变化,进而实现低能耗运行、低成本建造的低能耗建筑设计方法,初步建立了气候建筑的理论体系。为我国传统地域建筑生态经验传承,以及现代建筑的地域体现提供理论支持。

关键词 低能耗建筑, 建筑气候, 建筑设计

1 引言

大规模推广建造低能耗甚至零能耗建筑是实现我国建筑业碳中和战略的根本途径。所谓低能耗建筑,其核心内涵是指建筑物在其运行过程中消耗的常规能源很少甚至接近于零。研究表明,建筑运行能耗低的根本

原因在于,建筑物在室外气候的综合热湿作用下具备了“气候适应性”(working with climate),如传统地域建筑^[1]。大量实地测试表明,无论处于哪个地区的地域建筑,“冬暖夏凉、适应气候”是其最鲜明的特征,用现代建筑性能来“翻译”的话,就是节能性能、绿色性能指标优良,地域建筑文化特征突出。低能耗建筑的设计

引用格式: 杨柳. 建筑的气候响应机制与低能耗建筑设计原理. 中国科学: 技术科学, 2023, 53: 1781-1794

Yang L. Mechanisms of climatically responsive building and principles of low-energy building design (in Chinese). Sci Sin Tech, 2023, 53: 1781-1794, doi: 10.1360/SST-2023-0128

和建造表面上看是工程和技术问题,但也有亟待解决的深层次的科学问题.例如,优秀传统地域建筑的气候适应性如何形成?如何表述?如何通过设计拥有良好的气候适应性?这些都是现代建筑设计理论与方法面临的主要问题.

围绕以上问题,西安建筑科技大学低能耗建筑设计创新团队(以下简称“研究团队”)在国家杰出青年科学基金、国家自然科学基金重点项目以及国家重点研发计划等项目的资助下,通过大范围和多对象的现场观测、实验测试、理论分析、工程示范验证以及标准推广等方法,从传统地域建筑中蕴含的人、建筑空间与气候动态变化之间的相互对应关系入手,探索人对自然气候与建筑环境的适应过程、建筑对气候的响应机制,提出了运用建筑设计手法调控室内微气候的设计指标和参数,获得了人处于自然调控与机械调控环境的临界区间及其影响规律,进而以此为基础建立适应气候的低能耗建筑设计原理与方法,为我国地域建筑生态经验传承,以及现代节能建筑的地域多元体现提供理论支持.总体的研究框架如图1所示.

2 人与建筑的气候适应机理

2.1 人的气候适应机理与热适应模型

人的热舒适需求是建筑热环境的设计基准.适应气候是人类与其生存环境长期相互影响而形成的固有特征.现代建筑普遍依靠供暖通风与空调系统,运行能

耗高、成本高,也带来人的气候适应能力弱化等一系列问题.目前国内外建筑节能设计标准中室内基准温度多依据丹麦学者Fanger^[2]在20世纪70年代建立的预计平均热感觉指标(predicted mean votes, PMV)设定,据此方法确定的我国冬夏季设计温度分别为18℃和26℃,仅适用于人工设备调节的稳态热环境评价,忽略了地域气候特征和人对气候的适应能力.通过在全国开展现场调研,建立了涵盖中国建筑气候区的热舒适数据库,揭示了人对自然气候、建筑环境的适应过程,提出中国人群气候适应模型,为中国地域建筑设计提供了室内热环境的关键设计指标和参数^[3].

(1) 建筑热环境设计基础数据库

建筑室内热环境基础数据是建筑行业反映新时代“以人为本”发展理念的第一手数据.长期以来,国内仅有针对具体气候区、建筑类型及特定人群的小规模现场调研数据库^[4],缺少系统性的、专门针对中国建筑实际热环境的基础数据库.研究团队自1998年起,持续在全国气候区开展了大规模现场调研,根据抽样调查原理,建立了一整套室内热环境参数和人员主观评价的获取方法,获得了40000余组高质量主观、客观数据.每组数据由室内空气温度、湿度、风速、辐射温度等物理参数和人员主观评价参数以及性别、年龄、身高、体重等身体特征数据组成,满足建筑保温、隔热、防潮、自然通风、建筑遮阳设计及人工控制环境设备系统设计需求,覆盖住宅、办公建筑、商业建筑、教育建筑等典型建筑类型^[5-7],形成了涵盖中

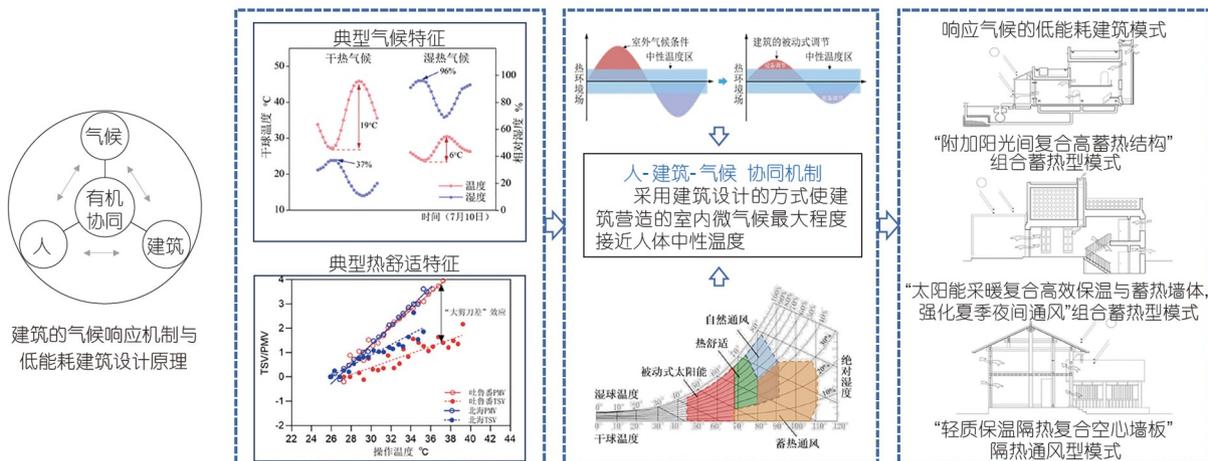


图1 研究框架
Figure 1 Framework of this research.

国所有气候区的标准化室内热环境基础数据库。针对热舒适评价中代谢率与服装热阻数据获取难、覆盖面少的难题,采用现场与实验室测量结合的方法,基于代谢率和服装热阻测量标准,建立了涵盖青年、中年、老年人群,覆盖办公、家庭、运动等多种活动类型的代谢率基础数据库和包含不同职业、习惯的服装热阻基础数据库,充分反映了中国人口结构及地域特色^[8]。

(2) 地域气候对热中性温度的影响规律

现代建筑基于全时间、全空间供暖空调模式削弱了人的热适应能力,这也是“建筑综合症”的根源之一。不同于全运行模式,我国现阶段仍然是以自然通风为主,结合采暖空调的局部运行模式。因此,探究我国建筑实际运行模式下人的舒适需求模型十分迫切。

采用现场实测与人工气候室研究相结合的方法,对动态建筑环境下人的主观评价指标,以及皮肤温度、心率、心率变异性、呼吸率、血容量、肌电等生理反应指标进行分析,结果表明人的生理和心理调节除了受到地域气候的影响外,还受到室内微气候的影响。在自然通风工况下人对热环境的适应能力最强,在局部运行模式下人的适应能力接近于自然通风工况,对热环境的接受度最高。

基于热舒适数据分析,发现中国人群室内中性温度呈现独特的“大剪刀差”现象(如图2所示):在冬季更耐“冷”,夏季更耐“热”,具有更广的热舒适温度范围^[9]。对于东部低海拔、气候湿润地区,室外空气温度是影响人体中性温度的主导气候要素;对于西部高海拔、强辐射地区,主导气候要素为室外空气温度和太阳辐射^[7,10]。还发现人的中性温度受到地域气候和室内微

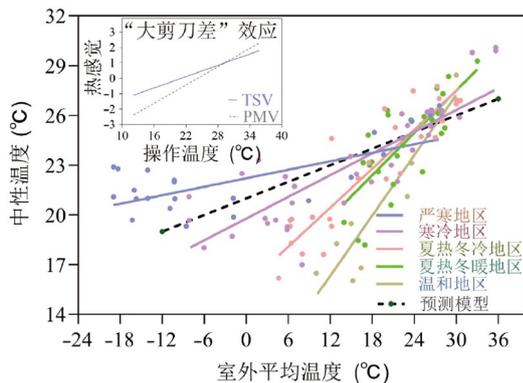


图2 典型气候区人的中性温度
Figure 2 Human neutral temperature in the typical climate zone.

气候的耦合影响,人群“由热向冷”的适应能力弱于“由冷向热”的适应规律,基于此分析科学指导建筑室内热环境的动态设计^[11]。

(3) 适应性热舒适模型

国际热舒适标准(ASHRAE 55-Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy)的热舒适模型是为全空调模式服务的模型,具有稳定、舒适、均匀等特征,但综合反映中国社会经济发展和居民行为习惯的是自然通风结合供暖空调局部运行模式。在这种特殊运行模式下,人的热适应特征如何?

基于地域气候对热舒适的影响规律,建立了新的热适应模型,量化了气候要素对人体中性温度的影响。多个气候类型下的实际工程案例证明人的中性温度可用双因素热适应模型有效预测^[3,12],如表1所示。该发现克服了国际上单因素热适应模型的局限性,提高了中性温度预测模型精度,获得了不同地域气候下的热舒适温度范围。针对综合反映中国社会经济发展和居民行为习惯的局部运行模式,建立了动态建筑环境下的热适应模型,实现了中国特有的按需供给模式下全年舒适温度的预测^[13,14]。

2.2 传统地域建筑与室内外气候波动的动态协同

我国传统民居建筑在长期“试错”的演进过程中形成了营造“冬暖夏凉”室内热湿环境的经验方法,但其物理机制缺乏科学化阐释,不利于在现代需求导向下的低能耗建筑设计中传承。

通过对黄土高原窑居、吐鲁番盆地生土民居等我国典型传统民居建筑大量的实地勘测及热湿环境调研,揭示了传统民居营造“冬暖夏凉”热湿环境的科学机理^[15,16]。传统地域建筑通过最大化利用建筑的空间形态与围护结构的“保温隔热与集蓄散热”综合热工性能,实现对室内微气候、室外气候波动的动态协同,即通过建筑的空间和形态、围护结构的保温、隔热与集蓄热等一体化热工设计,促进室内外低密度热量和质量流的有序流动,实现对室内热湿环境场的协同调控。通过调控室内气温波动、太阳辐射得热量和自然通风流量,使其室内平均辐射温度(mean radiation temperature, MRT)的日均值在全年大部分时间总是落在体感可接受的区间内(12~28°C),且其日波幅较小($\leq 2.5^\circ\text{C}$);室内平均辐射温度的周期性波动峰值总是在室外气温峰值6~10 h后出现^[17],如图3所示。

表 1 不同气候类型双因素热适应模型^{a)}

Table 1 Two-factor heat adaptation model of different climate types

气候类型	双因素热适应模型	中性温度(°C)	
		冬季	夏季
寒冷湿热	$T_n=9.5297+0.0277T_{rms}+0.0444P_{rms}+0.0005T_{rms}\times P_{rms}$	10.5	25.9
湿冷湿热	$T_n=4.1407+2.0234T_{rms}-0.0402P_{rms}-0.0026T_{rms}\times P_{rms}$	9.7	24.2
全年温和	$T_n=1.8066+1.4399T_{rms}+0.0608P_{rms}-0.0049T_{rms}\times P_{rms}$	16.2	23.6
高原气候	$T_n=14.5253+0.2743T_{rms}+0.1694P_{rms}-0.0073T_{rms}\times P_{rms}$	15.6	—
干冷干热	$T_n=83.0139+7.3926T_{rms}-4.5856P_{rms}-0.2552T_{rms}\times P_{rms}$ $+0.4110(T_{rms})^2+0.0559(P_{rms})^2$	19.9	31.5
寒冷温和	$T_n=23.0459+0.2150T_{rms}-0.1301P_{rms}+0.0003T_{rms}\times P_{rms}$ $+0.0064(T_{rms})^2+0.0005(P_{rms})^2$	19.9	26.1

a) T_{rms} 为室外5天权重连续日平均温度(°C), P_{rms} 为室外5天权重连续日平均水汽压(0.1 hPa)

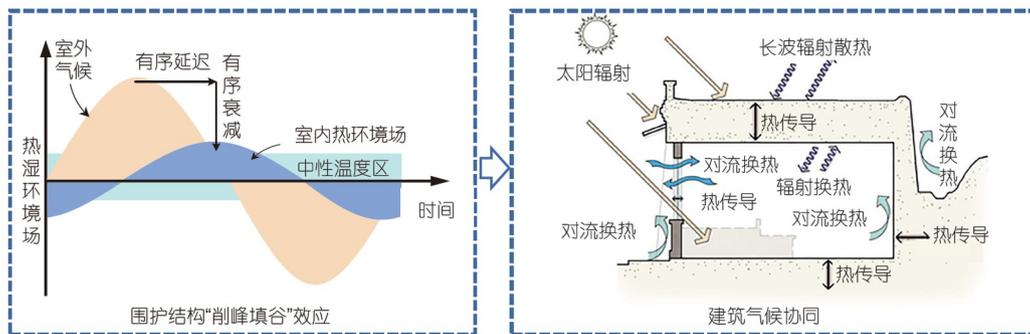


图 3 建筑的低能耗运行机理
Figure 3 Low energy consumption operation mechanism of building.

2.3 建筑对室内外气候的响应机制

处理好建筑与室内微气候、室外气候间的双向协同关系是实现建筑低能耗运行的关键, 需提出联系“人-建筑-气候”三者复杂系统间有机协同的设计参数与各要素之间的关联分析准则, 建立直观、便捷的考虑人体热适应特性的建筑气候分析模型, 在建筑方案阶段快速、准确地预测气候资源利用技术的应用潜力, 提升建筑方案阶段节能设计的靶向性。

根据人类工效学和热工学, 人体表面汗液的蒸发率和皮肤表面与周围空气的水蒸汽压力差值成正比, 又根据建筑热工学中干球温度、相对湿度、含湿量对人体舒适特性的影响规律, 获得了建筑室内微气候、室外气候可利用低密度热质流的动态变化对人体热舒适需求的影响, 即: 空气的温湿度及流速是影响人体舒适度的主导因素, 温湿度场的耦合效应随着其接近舒

适的临界状态而显著增强, 当温湿度处于临界状态时流场对其又有着显著的补偿效应; 温湿度场和流场多场耦合营造的室内热湿环境场与人体舒适需求的协同可实现最低冷热负荷。基于这些基础性研究, 提出了以表征冬季、夏季累积不舒适指数的年累积压力ACS (annual cummulative stress, $ACS=\sum_{i=1}^{12}(D_i^2+N_i^2)$)为指标的生物气候分析方法, 构建了基于层次聚类的建筑可利用低密度热质流辨识方法。将该方法应用至全球, 得到主要柯本气候分区(Köppen climate classification)在气候变异背景下ACS的特征: 热带气候(Tropical, A)的南美洲、非洲和东南亚地区的ACS呈增加趋势, 通过自然通风与机械通风相结合、提高夏季室内设计温度等措施可有效缓解建筑的节能减碳压力^[18]。

基于基础气象数据绘制的反映气候资源利用技术应用潜力的气候分类分区图可为气候资源的高效利用

提供最直接的指导. 美国学者Olgay^[19]和Givoni^[20]提出了将室外干球温度作为建筑气候调节技术利用潜力的分区指标. 研究团队从被动式太阳能采暖、蓄热通风、蒸发冷却、自然通风、建筑遮阳、被动辐射致冷等建筑热过程出发, 建立了综合考虑室外干球温度、相对湿度、太阳辐射等耦合影响的建筑气候分类分区方法, 获得了室外多类型热质流及其组合对室内热湿环境场的调节边界, 例如被动式太阳能采暖技术最低日平均温度6/9/13℃对应的日总辐射下限分别为130/190/248 W/m²; 自然通风降温技术最高温度上限30℃对应的补偿风速为2 m/s; 蓄热通风耦合降温最高温度上限34/39℃对应的气温日较差为8℃; 蒸发冷却降温最高温度上限为41℃. 以上即建筑形成的室内热湿环境场特征与室内外热质流密度、强度的匹配特征^[21].

基于此, 获得了冬季将太阳辐射能有序转化并弥补室内外温差传热损失的关键设计参数及其关系, 提出了表征被动式太阳能采暖气候资源潜力的“辐射度日比”指标, 并通过我国西部太阳能富集地区的多项工程试验进行了验证. 获得了夏季通过建筑的蓄热设计将可利用空气热能进行有序蓄存和释放的关键设计参数及其匹配关系, 提出了表征蓄热通风降温气候资源潜力的“气候降温潜力”指标, 并通过大陆性季风气候主导的我国北方地区多项工程试验进行了验证.

为了实现低能耗运行, 建筑需解决在全年范围内实现热质流的有序阻隔、蓄存、转化、集散等. 难点在于建筑在冬夏季室内外热质传递的方向发生逆转, 甚至热质传递的方式也不同, 与一般工业热交换设备的单一工况运行完全不同. 研究团队提出了以被动式太阳能采暖利用潜力为主要指标, 以不舒适热、湿指数为辅助指标, 协同考虑冬夏季设计目标的建筑气候分类分区方法, 绘制出了可直接指导被动式太阳能、自然通风、蓄热通风、蒸发冷却、建筑遮阳、被动辐射致冷等自然气候利用技术的建筑节能设计气候分区图谱^[22], 这有利于从建筑设计角度提升节能性能, 对我国因地制宜地实现对气候资源的高效利用提供理论支撑.

3 建筑的气候设计计算条件

充分利用气候资源是实现建筑低能耗运行的主要

技术途径之一. 因此, 对气候条件的准确刻画是实现低能耗建筑的前提. 基础气象数据主要包括温度、湿度、风速、压力等一般地面气象要素及总辐射、直接辐射等辐射要素, 这其中辐射资料的推算难度最大; 设计计算参数主要是服务于建筑热工设计、暖通空调设计、建筑节能设计的基础条件, 是在基础气象数据的基础上通过相应的统计方法计算获得. 建筑领域所用的气象及辐射数据主要源于气象部门观测. 面向新型城镇化建设需求, 观测台站数量偏少和空间分布不均都是辐射数据最主要的问题, 设计计算参数也有覆盖率低、统计时段久远等不足. 为此, 研究团队建立了辐射资料的时空拓展模型, 建立了建筑热工设计室外计算参数方法体系和数据集, 建立了不同气象辐射要素背景下的典型气象年方法, 获得了覆盖我国县域城镇的设计计算参数并评估了其工程设计的影响, 为我国建筑节能基础数据的普及应用提供基础支撑^[23].

3.1 太阳辐射资料推算方法

太阳辐射数据的推算一直是科学界关注的热点问题. 自19世纪20年代开始, 各国学者根据气候学原理或辐射传输理论构建了辐射与其他要素的关联关系, 根据技术路线的不同分为物理模型和统计模型^[24,25]. 相关研究证实, 对于已具有地面气象观测数据的地区, 统计模型具有一定的优势. 基于此, 采用统计模型进行了太阳辐射数据的空间化及逐时化研究, 形成了建筑领域太阳辐射数据资料推算的技术路径, 获得了太阳辐射资料数据集^[26].

通过大量数据实验, 对既有的各类统计模型进行了对比分析, 结果表明晴空指数、日照时数是影响模型精度的主要因素. 进一步基于各地晴空指数的显著差异建立了日照百分率总辐射模型及晴空指数-散射辐射模型^[27,28].

瞬时太阳辐射的多寡显然是受天气影响的. 经典的CPR(Collares-Pereira and Rade)模型在天气由晴到阴时整体适应性水平呈下降趋势, CPR模型对晴天状态下(日晴空指数高于0.7)的逐时总辐射推测精度较高. 大量的数据实验表明, 日照时数和地表温度是反映逐时总辐射变化规律的主要气象参数, 相对湿度能进一步表征湿润、半湿润气候地区逐时总辐射的波动. 基于此, 建立了适应干湿气候类型的“CPR模型+气象参数修正”的逐时总辐射推算方法, 可显著提升非晴天

状态逐时总辐射数据的质量。

美国学者Liu和Jordan^[29]提出平均晴空指数接近的地区,日照百分率-总辐射的变化规律相似。据此,研究团队提出“平均晴空指数最接近,辐射模型一致”的太阳辐射数据空间扩展方法,关键在于准确识别无辐射观测数据地区的平均晴空指数。以我国自然地理区划为约束,采用聚类方法识别我国区域尺度平均晴空指数分布具有7类典型特征,并确定了区域边界,将辐射资料由98个台站拓展到1000+县域城镇,为建立我国建筑节能设计参数标准提供数据基础。

上述模型的建立以气象辐射观测台站的数据为基础,但其实际观测场景是周围开阔的平地或开旷的山顶,无法反映复杂下垫面(地形起伏与属性)的影响。为更好地服务城市与建筑的规划设计,下一步应以数字高程(DEM)数据为基础,获得地形起伏对直接辐射和散射辐射遮挡及地表属性对反射辐射的影响,进而建立复杂下垫面下太阳辐射资料的推算方法。

3.2 建筑热工设计计算参数

随着经济社会发展水平的提高,人们对室内热环境的需求不断提高。建筑热工设计的目标从满足室内基本的生理卫生要求和防结露,上升到基本热舒适^[30]。因此,建筑热工设计条件也需细化和扩展,以适应新的设计方法和设计要求。

为简化计算,长期以来,采暖房间的保温设计所采用的热边界条件近似为稳定热作用,即假定空气温度等边界条件是一定值。该假设对于室内外温差较大、太阳辐射热作用较弱的情况是适用的^[31]。在我国西部高原地区,太阳能资源富集,太阳辐射热作用不可忽略,成为保温设计重要的有利条件,因此间歇采暖或被动式太阳能采暖设计应用较为广泛。另外,在我国夏热冬冷地区,冬季的室内外空气温度相对接近,室内的供暖末端也呈现多样化的特征,通过围护结构的传热会发生方向上的逆转。显然,稳定传热过程难以描述这些建筑物或围护结构的热过程。针对现有稳态保温设计无法满足太阳能富集地区冬季太阳能利用的设计需求和夏热冬冷地区改善冬季室内热环境水平的实际需求,建立了基于动态传热的保温设计方法,并以此为基础,创建了以太阳能利用为主的建筑技术支撑体系,相应的室外计算参数也提升为典型气象日逐时气象参数^[32,33]。这样,就将区域性保温设计的目标由

“日”提升到“时”,提高了保温设计的精细化水平,为太阳能富集地区建筑碳中和背景下的围护结构热工设计提供基础支撑。

自然通风于健康、降温等都是十分重要的。建筑为了取得良好的自然通风效果,需要对其朝向、开口等进行针对性的设计。目前应用较为广泛的是采用计算流体力学(CFD)的方法,但针对室外空气流速、温度、相对湿度等边界条件,取值方法尚无定论。“全年平均”“夏季典型日”“夏季典型季”等均有涉及。从建筑采用自然通风降温的角度出发,不同地区自然通风的作用和适用性不尽相同。例如,温和地区和严寒地区的大部分城镇,一年中适合采用自然通风降温的时段较长;寒冷地区的部分城镇,过渡季和炎热季也适合采用自然通风降温,其余时间为了达到室内的热舒适需求则需要采用人工环境控制设备;而到了夏热冬冷和夏热冬暖地区,采用自然通风能直接达到热舒适的时段会进一步降低。因此,气候条件不同,适宜自然通风的时段,即自然通风适用期大不相同。针对各不相同的实际状况,提出了基于室内热可接受温度计算模型、平衡点温度法、风速补偿模型及累计频次分布图的自然通风设计室外计算参数统计计算方法,建立了我国自然通风需求较强的县域城镇自然通风设计室外计算参数集^[34]。

建筑遮阳设计是建筑热工设计的重要组成部分,尤其是在夏热冬冷地区和夏热冬暖地区。类似于自然通风设计需要考虑适用期,建筑遮阳设计也需要考虑适宜遮阳的时段。主要是因为,太阳辐射最强和室外空气温度最高是不重合的,归根结底是由于下垫面的蓄热作用。例如夏至日这一天太阳辐射有可能最强,但空气温度还未达到最高。根据自然通风或间歇空调等房间运行方式的不同,明确了三种遮阳设计的目标,确定了相应的遮阳计算时段判定条件,提出“必须”“应”“宜”三个等级的设计要求,建立基于不同评价时长的建筑遮阳设计室外计算参数统计计算方法,将目前仅对某一特定时刻的评价提升至对整个遮阳时段的评价,获得遮阳需求较强的县域城镇建筑遮阳设计室外计算参数集^[35]。

以上以基于动态传热的保温设计方法及其室外计算参数、自然通风和建筑遮阳设计室外计算参数的确定方法为例,是人与建筑对气候适应在建筑热工设计中的具体体现,典型气象日、适用期、评价时长等体

现了建筑对室内外低密度热质流的靶向利用。

3.3 建筑能耗模拟气象年

建筑向性能化设计方向发展,对建筑能耗和碳排放的准确计算是前提,其中能够表征当地气候状态的逐小时的室外空气温度、相对湿度、太阳辐射等要素是基本边界条件,国际上将其叫做典型气象年(TMY)、标准年(CSWD)、参考年(TRY)等。究其根本,在于如何用一个虚拟年代表当地10年甚至更长一段时期的气候均态^[36,37]。美国Sandia国家实验室方法是目前获得典型气象年的通用方法,但该方法构成要素多且权重固定,地域气候的差异无从反映。此外,随着精细化模拟的发展,现有气象年数据不足以支撑县域及乡镇地区的建筑节能设计。为应对这些问题,在我国多样气候特征下对典型气象年方法的适用性进行分析,并适当修正,给出结合我国气象数据背景的典型气象年方法。

数据实验表明,采用标准偏差结合累积分布函数方法构建的气象年虽然体现了气候的正态分布规律,反映了典型月出现的概率以及与长期气候的相似程度,但忽略了不同地域气候差异的影响,且无法表征气象参数的时间序列特征。研究团队提出了依据不同类型气象参数对当地气候的贡献率作为权重值,将主观的专家经验赋权提升至对海量气象数据的定量分析,基于主成分分析的降维方法获得表征典型气候动态特征的最少气象要素组合为室外空气温度、相对湿度与日总辐射,建立了传统方法与人工智能方法结合的主成分气象年方法^[38,39]。

当关键要素缺测时,日照时数是反映日总辐射特征的最主要参数,研究证实其可作为替代日总辐射构成典型气象年的基本要素,模型误差不超过4.4%^[40]。上述研究获得我国1000+县域城镇的典型气象年数据集,提升了典型气象年数据的空间覆盖率,为建筑节能设计典型气象年数据的普及应用提供数据基础。

为服务于建筑全生命周期的能耗模拟计算,研究团队根据IPCC第五次报告选取符合我国情况的气候模式,评估未来气候变化对我国各气候区造成的影响,采用Morphing方法获得未来逐时气象数据,明确气候变化下反映建筑能耗的主要气象参数,建立了反映气候变化趋势的未来气象年,为建筑全生命周期精细化模拟提供数据支持。

3.4 设计计算条件更新

进行建筑热工设计、暖通空调设计、建筑节能设计所依据的室外设计条件主要来源于建筑行业标准规范,在修编过程中,气候设计条件的统计时段也在不断更新,如《民用建筑热工设计规范》(GB 50176-2016)^[30]、《建筑节能气象参数标准》(JGJ/T 346-2014)^[37]中气象数据的统计年限均为1995~2004年。随着气候的变异,统计年限滞后的问题日益凸显。为此,研究团队更新了民用建筑气候设计条件,将全国县级市的覆盖率从10%提升到50%,并在全国范围内比较了数据更新对工程设计的影响,以期对建筑业相关标准体系的修编提供依据。

依据2008~2017年和1995~2004年的气象数据计算对比保温设计计算参数。数据实验表明,最冷月平均温度、最低日平均温度以及采暖室外计算温度在新疆北部、甘肃南部、内蒙古等区域的降幅较大,这些区域属于严寒和寒冷地区,热工设计时更注重保温设计,有必要根据最新气象数据更新建筑热工设计条件^[41]。

对于民用建筑暖通空调设计室外计算参数最大负荷出现时间,各个气候区的出现时间基本一致。如能在工程设计中合理应用多种不保证率室外计算参数,可以取得较好的节能效益。如在夏季冷负荷计算中,需要重点关注高不保证率,即设计温度可略微偏高,这样可在提高极小温度的基础上实现较大程度的节能;反之,在冬季热负荷计算中,需要重点关注低不保证率,即设计温度只要略微偏低就可以实现较大的节能效益^[42]。

典型气象年数据更新前后,空调能耗显著增大,同时采暖需求较大的寒冷和严寒地区,供暖能耗降低,这与全球变暖的趋势一致。夏热冬冷和夏热冬暖地区的冬季能耗反而增加,这主要与极端天气发生的概率增加有关^[43,44]。

4 低能耗建筑设计原理与方法

早在西周时期,先民就形成了“取之以时”的利用自然资源的朴素观念,几千年来演化形成了适应不同气候类型的建筑模式。这些模式既符合当地经济文化水平,又舒适节能,其实质是通过综合运用建筑组合优化设计方法,使其在室外空气温度、湿度、太阳辐射等建筑低密度热质流的作用下,室内微气候无限逼

近于人体的舒适需求。

4.1 低能耗建筑设计原理

产生建筑能耗的原因是人体舒适需求和建筑所营造的热湿环境之间存在的差异。目前学界已从各个维度界定出了低能耗建筑设计的“理论”“方法”“原则”“策略”等。研究团队从建筑实现节能的根本途径出发,将低能耗建筑的实现路径分为被动的“气候阻隔”和主动的“气候适应”两类。第一类可概括为“建筑的设计仅规避气候的不利影响,不主动利用或被动利用气候的有利方面”;第二类则代表的是“建筑不仅规避气候的不利影响,更要积极地利用气候的有利方面”^[45]。从建筑对气候中所蕴含的自然能源的利用角度,第一类可视为建筑对气候所蕴含的太阳能、风能等自然能源的无序阻隔,第二类则是采用建筑设计的方法实现这些能源形式的有序流动。不能因为气候中可利用热质流是低密度的就采取无序阻隔的粗暴方式,否则将永远走高耗能、高排放的技术集成道路。第二类更能够激发设计师们的热情和灵感,因为优秀的传统建筑正是这样做的。

很显然,研究团队采用的是第二条路径,也通过大量的理论分析和工程试验验证得到建筑与当地气候特征响应得当的准则:建筑可以不依赖或极少依赖人工环境控制系统(HVAC),仅通过建筑的“形态空间及其材料构造”的综合设计,即可使室内热环境满足人的热中性需求。据此,提出了低能耗建筑设计原理:综合运用建筑形态、空间、构造的组合优化设计,使建筑“室内微气候”尽可能接近“体感中性热环境”,即设计气候≈中性气候,如图4所示,由此也提出了具有地域性的“辅助耗热量指标”“负荷集热比”“有效蓄冷量”等一系列设计指标,并建立了工程简化设计计算方法。

4.2 低能耗建筑设计方法

依据低能耗建筑需要具备“人-建筑-气候”多系统的高度协同机制的设计原则,总体上提出了基于多目标寻优的“循环反馈”式建筑设计方法:运用“气候分析-多目标性能优化-节能模式建构-性能评价与分析-节能模式再建构-确定实施方案”的系统循环反馈式设计,实现建筑的运行能耗最低化、温室气体排放最少化、成本投入最小化、地域气候特征明确化的设计目标。总体的思路是:通过提出衡量建筑本体吸收利用太阳能等自然能源的关键特征指标,获得该指标与建筑能耗等性能指标之间的联动关系,指导低能耗建筑的形体、空间、开口和围护结构设计。

(1) 建筑本体设计的节能贡献率计算模型和“三重气候”解析法

建筑节能减碳设计的视角已由局部控制走向整体优化、由单一季节走向全年优化、由单一热作用到室内内外耦合热作用、由单一物理场到全物理场作用。建筑与室内外(微)气候间的热质传递为一复杂动态过程,热边界条件强非线性,传统的稳态过程、单一类别边界条件下的指标计算模型失效。

研究团队面向建筑师方案设计需求,建立了非线性复杂热边界条件下建筑与气候动态耦合的计算模型,提出了基于室内微气候、室外气候和人群舒适需求耦合的“三重气候”解析法,以室外气候为基准刻画建筑可利用低密度热质流的多寡,以人群适应性热舒适模型为基准定义了人群舒适需求,提出以自由运行工况下全年室内外热质流与建筑需求热质流的温度度时数之比作为衡量建筑本体节能贡献率的评价标尺,建立了“相对舒适气候比”的建筑本体节能性能综合评价方法^[46]。“三重气候”解析法基于前述的人群适应性热舒适模型,定义了基准度时数、设计度时数和建筑

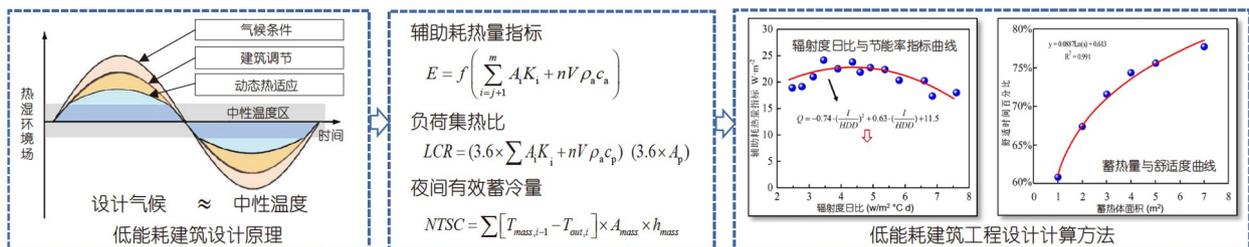


图4 低能耗建筑设计方法
Figure 4 Low building energy consumption design method.

调节度时数指标, 有利于在方案设计阶段快速确定建筑本体的节能贡献率, 凸显建筑设计在建筑节能减碳中的作用^[47].

对于“人-建筑-气候”复杂动态热质传递过程和非线性复杂热边界条件, 采用有限差分法和状态空间法耦合的方法建立了线性/非线性蓄热型围护结构与建筑本体动态热质传递的耦合计算模型, 并集成于我国具有完全自主知识产权的建筑热环境设计模拟分析软件DeST3.0中, 支撑我国双碳目标导向下的建筑模拟分析工作^[48].

(2) 基于零采暖空调能耗目标的气候建筑设计方法与参数

采暖能耗是我国建筑能耗的主要组成部分. 我国西部高原地区太阳能富集, 建筑具备利用太阳能实现零采暖能耗极其有利的条件. 我国现行民用建筑设计标准体系中, 考虑建筑的太阳能利用时采用相对保守的修正系数等方法, 实则是将其作为富余量考虑, 这与当地的实际情况不相符合. 当地建筑所需采暖辅助耗热量不仅与室内外温差密切相关, 也与太阳辐射得热量有很大关系. 研究团队通过大量实地勘测和模拟研究, 提出以辅助耗热量作为建筑太阳能采暖性能评价指标, 发现辅助耗热量指标(E_{aux})和建筑太阳能集热效率正相关、和建筑采暖负荷负相关. 该指标解决了现行标准体系中建筑耗热量指标未纳入太阳能热效应的难题. 引入评判太阳能集热系统性能的被动式太阳能采暖节能率(solar saving fraction, SSF)和建筑的负荷集热比(load collector ratio, LCR)作为求取辅助耗热量指标的过程参数, 建立了 E_{aux} 和太阳能建筑设计参数之间的匹配关系: $E_{\text{aux}}=(1-\text{SSF})\cdot\text{LCR}\cdot A_p\cdot(T_n-T_c)/A_0$. 这样就可以通过以 E_{aux} 为优化目标, 调整建筑集热部件和围护结构热工性能参数, 最终实现节能目标值. 典型工况下的工程图表十分便于工程应用. 基于零采暖能耗目标的太阳能建筑的性能化设计方法, 确定了西部高原节能建筑的LCR-SSF匹配曲线: 当LCR趋近于0时, SSF趋近于0; 当LCR趋近于10时, SSF趋近于1(即零采暖能耗), 且曲线斜率随LCR的增加呈现先增大后减小的变化规律^[49,50]. 基于此, 研发了简化计算方法和系列设计计算软件^[51], 该方法已应用于工程实际, 是西藏自治区《居住建筑节能设计标准》^[52]的重要组成部分.

大陆性季风气候主导下的我国北方主要遵循以应

对冬季保温为目标、以“轻质保温”型围护结构为主的建筑热工设计模式, 对夏季工况高辐射、大温差气候下的可利用室外热质流利用不足. 研究团队建立了以零空调能耗为目标、以建筑的蓄热通风降温技术为核心的节能设计方法, 提出了提升建筑的蓄热能力以调节辐射场、利用建筑的通风调节流场的耦合效应, 解决热量供需在时空上的不匹配的“保温+蓄热+通风”设计模式^[53,54]. 获得我国不同地区利用夜间冷量资源进行降温的地域适宜性规律, 建立了蓄热通风型建筑的设计区划. 通过北方大陆性季风气候下大量现场实测和建筑的缩尺模型实验, 获得了围护结构热特性的综合影响规律, 仅增加围护结构热惰性指标对内表面温度的日波幅无显著影响, 但发现其与内表面蓄热系数之间呈负相关关系. 因此, 提出围护结构蓄热性能表征参数是热惰性指标和内表面蓄热系数的组合, 完善了建筑热工设计指标体系.

以上分别从具有显著地域性的、基于零采暖能耗和零空调能耗目标的气候建筑的设计方法与参数进行了解析, 虽然给出了方法框架, 但由于针对的是我国最易实现零采暖和零空调能耗的气候类型, 其他适宜气候条件下, 还需结合具体气候条件和建筑特征等, 进行方法修正和参数优化.

4.3 响应典型气候的低能耗建筑模式

响应气候的低能耗建筑设计原理和方法必须经过大量的实际工程验证, 并对其进行进一步的修正和完善, 才能进一步实现区域性甚至全国推广, 如图5所示. 以窑居建筑为例, 运用气候适应型低能耗建筑设计原理与方法, 经过理论分析、设计创作、示范验证等环节, 提出了我国几类典型气候条件下的低能耗建筑模式, 包括设计计算参数、一体化设计方法等, 可在西部极端气候条件低成本建造、低能耗运行.

针对干热干冷新疆盆地气候条件, 提出了“太阳能采暖复合高效保温-蓄热一体化墙体, 同时耦合夏季夜间通风”的低能耗建筑模式^[16], 如图6所示. 该模式的提出历经传统建筑调研、气候原型提炼、新型民居示范等环节, 贯穿方案设计、构造设计、施工建造、性能评测全过程. 运用同样的研究范式, 针对太阳能富集的青藏高原高寒气候条件, 提出了“太阳能采暖复合高效保温-蓄热一体化墙体”的低能耗建筑模式; 针对辐射较丰富、寒冷型黄土高原气候条件, 提出了“附加阳

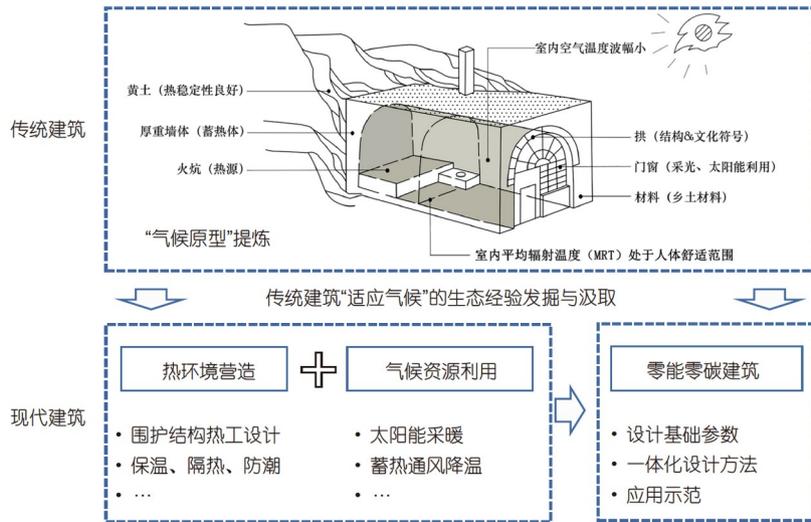


图 5 响应气候的低能耗建筑模式提炼

Figure 5 Extraction of climate responsive low energy consumption prototype.



图 6 干热干冷新疆盆地气候低能耗建筑模式

Figure 6 Low energy consumption prototype of dry hot and dry cold climate in Xinjiang basin.

光间复合高蓄热结构”的低能耗建筑模式^[55];针对湿热湿冷的川地盆地气候条件,提出了“轻质保温隔热复合空心墙板耦合通风”的低能耗建筑模式;针对极端湿热气候条件,提出了“轻质墙板复合深遮阳大开口耦合通风”的低能耗建筑模式.通过对这些建成建筑的实测评估,证明了响应气候的低能耗建筑模式应用效果良好,

尤其是得到了当地居民的好评,凸显了具有地域特征、成本可控、运行能耗低等特点,具有较好的推广应用价值.具体的某个工程项目总是受当时经济技术水平等的约束,而技术在不断进步.20年来,这些低能耗建筑模式随着经济社会的发展不断更新进化,日趋完善.

5 结论

以支持实现建筑业碳中和战略目标为出发点, 研究团队通过大范围、多对象的现场勘测、大型复杂工程试验验证与标准推广等方法, 挖掘汲取优秀地域建筑的生态经验, 建立了响应气候的低能耗建筑设计原理与方法, 为我国现代节能低碳建筑的发展提供理论支撑, 初步建立了体现建筑学学科的技术科学属性的研究范式. 主要结论如下.

(1) 揭示了地域建筑营造“冬暖夏凉”环境、实现低能耗运行的科学机理, 阐释了建筑与室内外微气候动态协同机制, 建立了基于人体动态热适应规律的建筑气候分析模型, 建立了40000余组高质量主观、客观数据的中国建筑热环境设计基础数据库, 获得了中国实际地域气候和实际运行模式下人群热舒适特性和模型. 人与建筑的气候适应机理为响应气候的低能耗建筑设计奠定了理论基础.

(2) 揭示了地域气候下太阳辐射与气象要素的关

联关系, 建立了辐射资料的时空拓展方法, 建立和完善了我国建筑热工设计计算参数方法, 建立了基于辐射与气温综合反映气候特征周期变化典型气象年方法, 设计基础参数总体上覆盖1000+县域城镇, 已支持建筑节能减碳领域标准建设, 为响应气候的低能耗建筑设计和推广提供了设计条件.

(3) 建立了实现建筑低能耗运行的基本原理, 提出了基于零采暖和零空调能耗目标的气候建筑的设计方法, 建立了相应的指标体系与参数, 提出了响应典型气候的低能耗建筑模型, 解决了地域建筑在节能性能、技术经济与文化特色方面系统整合的设计难题.

研究团队提出的低成本、易建造且独具地方风貌特色的气候适应型低能耗建筑原型, 兼顾社会、经济、气候、文化等因素, 已广泛应用于新疆、西藏、陕西、甘肃、四川、云南、宁夏等地, 支持完成23项低能耗建筑工程示范项目, 对低能耗建筑的推广应用起到重要促进作用, 推动了我国建筑节能减碳行业的发展.

致谢 作者对刘加平院士的关心和指导, 以及西安建筑科技大学零能零碳建筑团队教师和学生的帮助表示衷心的感谢.

参考文献

- Liu J P. The scientific evaluation and regeneration of eco-building experience in traditional dwellings (in Chinese). *Bull Natl Nat Sci Found China*, 2003, 17: 234–236 [刘加平. 传统民居生态建筑经验的科学化与再生. *中国科学基金*, 2003, 17: 234–236]
- Fanger P. *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970. 114–132
- Yang L, Yan H Y, Mao Y, et al. *Climate Adaptation Basis of Human Thermal Comfort* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2017. 96–99 [杨柳, 闫海燕, 茅艳, 等. 人体热舒适的气候适应基础. 北京: 科学出版社, 2017. 96–99]
- Földváry Ličina V, Cheung T, Zhang H, et al. Development of the ASHRAE global thermal comfort database II. *Build Environ*, 2018, 142: 502–512
- Yang L, Yan H Y, Xu Y, et al. Residential thermal environment in cold climates at high altitudes and building energy use implications. *Energy Build*, 2013, 62: 139–145
- Wang X, Yang L, Gao S R, et al. Thermal comfort in naturally ventilated university classrooms: A seasonal field study in Xi'an, China. *Energy Build*, 2021, 247: 111126
- Zhao S K, Yang L, Gao S R, et al. Field investigation on the thermal environment and thermal comfort in shopping malls in the cold zone of China. *Build Environ*, 2022, 214: 108892
- Zhai Y C, Li M H, Gao S R, et al. Indirect calorimetry on the metabolic rate of sitting, standing and walking office activities. *Build Environ*, 2018, 145: 77–84
- Yang L, Yan H Y, Lam C J. Thermal comfort and building energy consumption implications—A review. *Appl Energy*, 2014, 115: 164–173
- Yan H Y, Yang L, Zheng W X, et al. Influence of outdoor temperature on the indoor environment and thermal adaptation in Chinese residential buildings during the heating season. *Energy Build*, 2016, 116: 133–140
- Zheng W X, Yang L, Song X J, et al. Various levels of adaptation in four seasons of a year in cold climatic zone of China (in Chinese). *JHV&AC*,

- 2015, 45: 80–85 [郑武幸, 杨柳, 宋晓吉, 等. 寒冷地区人体自适应水平的气候季节性变化. 暖通空调, 2015, 45: 80–85]
- 12 Yan H Y. Study on adaptive thermal comfort on the basis of regions and climates of China (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013. 105–148 [闫海燕. 基于地域气候的适应性热舒适研究. 博士学位论文. 西安: 西安建筑科技大学, 2013. 105–148]
- 13 Yan H Y, Mao Y, Yang L. Thermal adaptive models in the residential buildings in different climate zones of Eastern China. *Energy Build*, 2017, 141: 28–38
- 14 Yan H Y, Liu Q Q, Zhang H, et al. Difference in the thermal response of the occupants living in northern and southern China. *Energy Build*, 2019, 204: 109475
- 15 Liu J P, Wang L J, Yoshino Y, et al. The thermal mechanism of warm in winter and cool in summer in China traditional vernacular dwellings. *Build Environ*, 2011, 46: 1709–1715
- 16 Yang L, Fu R, He W F, et al. Adaptive thermal comfort and climate responsive building design strategies in dry-hot and dry-cold areas: Case study in Turpan, China. *Energy Build*, 2020, 209: 109678
- 17 Yang L, Liu J P. Inheritance and renewal of traditional Yaodong dwellings on the loess plateau (in Chinese). *Herit Archit*, 2021, 22: 22–31 [杨柳, 刘加平. 黄土高原窑洞民居的传承与再生. 建筑遗产, 2021, 22: 22–31]
- 18 Lam J C, Yang L, Liu J P. Development of passive design zones in China using bioclimatic approach. *Energy Convers Manage*, 2006, 47: 746–762
- 19 Olgay V. *Design with Climate*. New Jersey: Princeton University Press, 1963. 17–23
- 20 Givoni B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy Build*, 1992, 18: 11–23
- 21 Yang L, Lu J C, Liu Y, et al. A bioclimatic analysis method for the potential of passive solar heating based on climate adaptability in different regions and building characteristics in China (in Chinese). *Build Energy Efficiency*, 2021, 49: 1–8 [杨柳, 鲁俊忱, 刘衍, 等. 建筑太阳能采暖潜力分析方法的修正及应用. 建筑节能, 2021, 49: 1–8]
- 22 Yang L. Climatic analysis and architectural design strategies for bio-climatic design (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2003. 75–108 [杨柳. 建筑气候分析与设计策略研究. 博士学位论文. 西安: 西安建筑科技大学, 2003. 75–108]
- 23 Yang L, Liu Y, Duanmu L, et al. Research progress on the fundamental parameters for building energy efficiency design in China (in Chinese). *Build Sci*, 2021, 37: 155–163 [杨柳, 刘衍, 端木琳, 等. 建筑节能设计基础参数的研究进展. 建筑科学, 2021, 37: 155–163]
- 24 Letu H, Shi J C, Li M, et al. A review of the estimation of downward surface shortwave radiation based on satellite data: Methods, progress and problems (in Chinese). *Sci Sin Terr*, 2020, 50: 887–902 [胡斯勒图, 施建成, 李明, 等. 基于卫星数据的地表下行短波辐射估算: 方法、进展及问题. 中国科学: 地球科学, 2020, 50: 887–902]
- 25 Cao Q M, Liu Y, Sun X, et al. Country-level evaluation of solar radiation data sets using ground measurements in China. *Energy*, 2022, 241: 122938
- 26 Cao Q M, Liu Y, Lyu K L, et al. Solar radiation zoning and daily global radiation models for regions with only surface meteorological measurements in China. *Energy Convers Manage*, 2020, 225: 113447
- 27 Wan K K W, Tang H L, Yang L, et al. An analysis of thermal and solar zone radiation models using an Angstrom-Prescott equation and artificial neural networks. *Energy*, 2008, 33: 1115–1127
- 28 Yang L, Cao Q, Yu Y, et al. Comparison of daily diffuse radiation models in regions of China without solar radiation measurement. *Energy*, 2020, 191: 116571
- 29 Liu B Y H, Jordan R C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Sol Energy*, 1960, 4: 1–19
- 30 Yang L, Zhang X R, Liu Y, et al. Present situation of outdoor calculating parameters for the thermal performance design of the building envelope (in Chinese). *Build Sci*, 2019, 35: 55–61 [杨柳, 张向荣, 刘衍, 等. 围护结构热工设计室外计算参数现状分析. 建筑科学, 2019, 35: 55–61]
- 31 Ministry of Housing and Urban-Rural Development, PRC. Code for Thermal Design of Civil Building (GB 50176–2016) (in Chinese). Beijing: China Architecture and Building Press, 2017 [中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑热工设计规范(GB 50176–2016). 北京: 中国建筑工业出版社, 2017]
- 32 Zhang S, Yao H, Li C, et al. A new thermal insulation design method based on solar energy utilization for residential buildings and generation method for outdoor design parameters (in Chinese). *Build Sci*, 2022, 38: 15–22 [张率, 姚慧, 李晨, 等. 太阳能利用型居住建筑保温设计方法及室外计算参数. 建筑科学, 2022, 38: 15–22]

- 33 Zhang S, Yang L, Suonam B, et al. Method for dynamic thermal insulation design revealing almost real heat transfer characteristics of building envelopes in different Chinese regions. *Energy Build*, 2022, 274: 112419
- 34 Zhang C, Liu Y, Yang L, et al. A method for determining outdoor calculation parameters of natural ventilation design based on climate suitability analysis (in Chinese). *Build Sci*, 2020, 36: 123–130, 168 [张辰, 刘衍, 杨柳, 等. 基于气候适应性分析的自然通风设计室外计算参数确定方法研究. *建筑科学*, 2020, 36: 123–130, 168]
- 35 Zhang X R, Liu Y, Yang L, et al. Research on the determination method of outdoor design conditions of sun shading design (in Chinese). *Build Sci*, 2020, 36: 95–103 [张向荣, 刘衍, 杨柳, 等. 建筑遮阳设计室外计算参数的确定方法研究. *建筑科学*, 2020, 36: 95–103]
- 36 Yang L, Lam J C, Liu J P. Analysis of typical meteorological years in different climates of China. *Energy Convers Manage*, 2007, 48: 654–668
- 37 Ministry of Housing and Urban-Rural Development, PRC. Standard for weather data of building energy efficiency (JGJ/T 346–2014) (in Chinese). Beijing: China Architecture and Building Press, 2015 [中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑节能气象参数标准(JGJ/T 346–2014). 北京: 中国建筑工业出版社, 2015]
- 38 Lam J C, Wan K K W, Cheung K L, et al. Principal component analysis of electricity use in office buildings. *Energy Build*, 2008, 40: 828–836
- 39 Yang L, Wan K K W, Li D H W, et al. A new method to develop typical weather years in different climates for building energy use studies. *Energy*, 2011, 36: 6121–6129
- 40 Hu Y, Li H L, Wang S Y, et al. Analysis of typical meteorological year and hourly value generation method with radiation data missing (in Chinese). *J Harbin Inst Tech*, 2022, 54: 163–170 [胡尧, 李红莲, 王赏玉, 等. 辐射数据缺失时TMY与逐时值生成方法分析. *哈尔滨工业大学学报*, 2022, 54: 163–170]
- 41 Liu Y, Guo X F, Yang L, et al. Study on outdoor design conditions for thermal insulation design of building envelope. *Build Sci*, 2022, 38: 167–174 [刘衍, 郭向斐, 杨柳, 等. 围护结构保温设计室外计算参数研究. *建筑科学*, 2022, 38: 167–174]
- 42 Li W T, Liu Y, Yang L, et al. Analysis and study of annual cooling consumption indicator of nearly zero energy residential buildings (in Chinese). *J HV&AC*, 2022, 52: 120–126 [李文涛, 刘衍, 杨柳, 等. 近零能耗居住建筑供冷年耗冷量指标分析研究. *暖通空调*, 2022, 52: 120–126]
- 43 Li H L, Yang Y, Lyu K L, et al. Compare several methods of select typical meteorological year for building energy simulation in China. *Energy*, 2020, 209: 118465
- 44 Liu Y, Wang S Y, Cao Q M, et al. Country-level meteorological parameters for building energy efficiency in China. *J Cent South Univ*, 2022, 29: 2301–2316
- 45 Yang L. Bioclimatic Architecture (in Chinese). Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. 10–13 [杨柳. 建筑气候学. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. 10–13]
- 46 Liu Y, Yang L, Zheng W X, et al. A novel building energy efficiency evaluation index: Establishment of calculation model and application. *Energy Convers Manage*, 2018, 166: 522–533
- 47 Liu Y, Hu J L, Yang L, et al. Energy saving rate calculation model of envelope structure based on “triple climate” analysis (in Chinese). *Build Energy Efficiency*, 2022, 50: 50–58 [刘衍, 胡家磊, 杨柳, 等. 基于“三重气候”解析法的严寒和寒冷地区居住建筑围护结构节能率计算模型. *建筑节能*, 2022, 50: 50–58]
- 48 Yan D, Zhou X, An J J, et al. DeST 3.0: A new-generation building performance simulation platform. *Build Simul*, 2022, 15: 1849–1868
- 49 Meng X X, Liu Y, Wang S Y, et al. Modified calculation of energy-efficiency performance indices on small solar heating buildings (in Chinese). *Acta Energy Solar Sin*, 2022, 43: 115–123 [孟祥鑫, 刘衍, 王赏玉, 等. 小型太阳能采暖建筑节能性能指标简化计算. *太阳能学报*, 2022, 43: 115–123]
- 50 Meng X X, Liu Y, Wang S Y, et al. A fast solar architecture design method towards zero heating energy: A SHF-SLR-based model and its parameters. *Energy*, 2022, 258: 124897
- 51 Meng X X, Liu Y, Han Y, et al. Defining and grading passive solar heating potential indicator in China: A new irradiation degree hour ratio parameter. *Sol Energy*, 2023, 252: 342–355
- 52 Xi'an University of Architecture and Technology. Design Standard for Energy Efficiency of Residential Buildings in Tibet (DB 54/0016–2007) (in Chinese). Lhasa: The Tibet People's Publishing House, 2007 [西安建筑科技大学. 西藏自治区地方标准《居住建筑节能设计标准》(DB 54/0016–2007). 拉萨: 西藏人民出版社, 2007]
- 53 Yang L, Qiao Y H, Liu Y, et al. Review of phase change heat storage and night ventilation technology of buildings (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 629–640 [杨柳, 乔宇豪, 刘衍, 等. 建筑相变蓄热及夜间通风技术研究进展. *科学通报*, 2018, 63: 629–640]
- 54 Liu Y, Hou L Q, Liu J, et al. Impact of thermal storage capacity of envelope on building load (in Chinese). *Acta Energy Solar Sin*, 2018, 39:

3138–3146 [杨柳, 侯立强, 刘江, 等. 围护结构蓄热性能对建筑负荷的影响分析. 太阳能学报, 2018, 39: 3138–3146]

55 Liu J P, David W, Yang L. An instance of critical regionalism: New Yaodong dwellings in north-central China. *Tradit Dwell Settlement Rev*, 2002, 13: 63–70

Mechanisms of climatically responsive building and principles of low-energy building design

YANG Liu^{1,2}

¹ *State Key Laboratory of Green Building, Xi'an 710055, China;*

² *School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China*

Building working with climate is an important aspect of implementing low-energy or even zero-energy buildings. However, the use of heating, ventilation, and air conditioning systems to obtain a comfortable indoor environment in modern buildings remains a widespread “blind spot” in the theory and practice of modern architectural design. Furthermore, using these systems causes high energy consumption and costs, involves low utilization of natural climate resources, and lacks regional characteristics. Extensive field tests have demonstrated that “warm in winter and cool in summer” and low energy consumption are basic attributes of traditional regional architecture; however, its scientific principle and mechanism of climate adaptation are rarely discussed, resulting in the lack of application of its experience in modern design. Investigating the climate adaptation mechanism of traditional buildings and developing a climate-responsive theory and method for building energy-efficient design is the fundamental approach for designing and constructing low-energy buildings, inheriting and improving the ecological experience of regional buildings, and implementing “new regional architecture”. By integrating architecture, climate and building environmental science and examining the correlation between people, space, and the dynamics of climate in traditional regional buildings, all-around field tests covering all the climate zones in China are performed. These all-around field tests combine experiment and theoretical analysis, project demonstration, and standard application. Furthermore, the adaptation process of humans to natural climate and built environment, as well as the response mechanism and adaptation law of buildings to climate, are investigated, the key design indexes and parameters for controlling indoor climate through architectural design are suggested, and the critical threshold law of human being in the natural environment is obtained. Based on this, the low-energy building design method of implementing low-energy consumption operation and low-cost construction is proposed. This enables the building envelope structure and its enclosure space design to be responsive to dynamic climate fluctuation, thereby providing theoretical support for the inheritance of the ecological experience of regional buildings in China and the diversified regional manifestation of modern energy-efficient buildings.

low energy building, building climate, architectural design

doi: [10.1360/SST-2023-0128](https://doi.org/10.1360/SST-2023-0128)