被动式超低能耗建筑设计基础与应用

杨柳*, 杨晶晶, 宋冰, 朱新荣

西安建筑科技大学建筑学院, 西安 710055

* 联系人, E-mail: yangliu@xauat.edu.cn

2015-01-16 收稿, 2015-02-12 接受, 2015-04-20 网络版发表

国家杰出青年科学基金(51325803)、国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金(51221865)和国家“十二五”科技支撑计划课题(2014BAJ01B01)资助

摘要 人居环境的可持续发展需要同时解决建筑环境质量、建筑节能减排以及地域文化传承问题, 运用被动式建筑设计技术创建适宜于地域气候与资源环境的超低能耗建筑是实现人居环境可持续发展的根本途径. 本文从被动式设计原理出发, 提炼了实现超低能耗建筑设计的关键技术问题, 并综合运用建筑学、建筑气候学和建筑环境工学等交叉学科基本理论, 通过理论分析、实验测试、方案设计与工程示范, 系统建立了室内人体热舒适需求规律和室外典型气候的精细化表征方法, 提出了低能耗建筑设计的气候分析技术与气候分区方法, 被动式太阳能采暖与蓄热通风降温技术的热工设计计算方法, 形成了被动式超低能耗建筑设计理论体系, 并在西部地区得到推广和应用, 为地域建筑的可持续发展提供了理论支撑和解决途径.

关键词

人居环境
被动式设计
超低能耗建筑
建筑节能
中国西部
可持续发展

人居环境的可持续发展, 既要在快速的城镇化进程中不断提高建筑环境质量, 也要节约建筑能耗和减少污染物排放, 还要继承和发扬传统地域建筑文明. 然而, 建立在工业文明基础之上的现代建筑体系, 在满足人们对建筑空间和环境需求的同时, 则须付出高能耗、高污染以及湮灭传统地域建筑文明的代价.

我国虽然地域广袤, 但人口众多. 在此基数之上的能源与资源极其短缺, 生态环境脆弱, 经济发展落后. 在快速的城镇化进程中, 简单地继承传统的建造方式, 或者单一运用现有的城市建筑设计规范及方法, 均不能有效解决建筑环境质量、建筑节能减排和建筑文化传承的综合需求问题. 目前, 城镇建筑要么“千篇一律”、“千城一面”, 要么“贪大求洋”、“媚俗求怪”. 因此, 急需针对地域气候条件和社会经济文化背景, 研究发展可持续的低(超低)能耗建筑设计方法体系, 以保证建筑室内环境的舒适性、地域建筑风貌和传统生态经验的传承, 同时尽可能利用太阳能、风

能等自然能源, 实现能源的节约. 此方法被学界称之为“被动式低(超低)能耗建筑设计”.

被动式低能耗建筑设计理论与方法是研究运用建筑设计的而非人工环境控制(主动式)的方法与技术创建室内热舒适, 同时也是研究建筑与室外气候、室内微气候相互作用的科学. 现代建筑室内热环境设计遵循稳态热平衡理论, 完全依赖采暖、通风、空调等主动式环境控制技术来维持和调节室内热环境在相对稳定、均匀的舒适状态, 室内微气候与室外自然气候完全隔离, 既耗能又不健康. 由于人体需求的热舒适处于常温状态, 通常为18~26℃, 多数地区室外气候在大部分时间具备这种舒适条件, 因此, 如果能够采用合理的建筑设计方法如太阳能采暖、自然通风等被动式技术, 充分利用这部分时间的自然冷/热量, 即可大幅减少建筑设备能耗, 实现超低能耗甚至零能耗建筑, 这就是建筑的被动式设计原理^[1]. 一般将建筑能耗接近于零的建筑称为超低能耗建筑或近零能耗建筑.

引用格式: 杨柳, 杨晶晶, 宋冰, 等. 被动式超低能耗建筑设计基础与应用. 科学通报, 2015, 60: 1698–1710

Yang L., Yang J. J., Song B., et al. Fundamental research and practice of passive and ultra-low energy consumption buildings (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 1698–1710, doi: 10.1360/N972015-00058

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N972015-00058>

被动式设计涉及2个关键问题和1个设计目标:第1个问题是,气候资源利用的可行性问题,即室外气候在什么条件下可用于室内采暖和降温?第2个问题是,建筑设计方法问题,即采用什么样的建筑技术措施和怎样采用这些技术,实现对气候冷热源的利用,也就是被动式设计方法问题.需要实现的目标是:尽可能缩小人体热舒适需求与室外气候的差异,尽可能扩大建筑的被动式技术可调节和控制的气候区间,从而最大限度降低建筑对人工环境设备的需求(图1).

围绕以上问题和目标,提炼出如下若干基础问题.(1)建筑气候分析技术与室外气候特征的描述方法.我国建筑节能始于20世纪80年代初期,不仅缺乏设计前期针对室外气候自然冷热源可利用率的定量分析方法,而且还缺乏精细化模拟分析用室外气候数据.(2)室内热舒适预测与评价技术.对于我国普遍存在的自然通风模式(零能耗)或自然与设备调节相混合(低能耗)模式,缺乏全国尺度的热舒适预测模型.(3)被动式设计方法.我国建筑节能研究一直集中在单项技术的研发与设备系统能效的提升方面,针对地域资源与气候,提出系统综合的被动式低能耗建筑设计方法未有系统报道.

综合运用建筑学、建筑气候学和建筑环境工学原理,在理论分析、实验测试和数据统计的基础上,揭示了中国人群众在自然气候波动条件下的热舒适规律,界定了各类被动式技术适宜的气候界域,建立了基于人体热需求的气候分析方法,提出了被动式太阳能采暖和蓄热通风降温设计计算方法,实现了方案阶段综合定量分析“人-建筑-气候”3个复杂系统的科学难题.上述理论成果首先在中国西部进行了开创性应用与实践,形成了黄土高原、西北旱区和四川震区等多种低能耗乡村建筑设计模式,成为中国地域建筑更新设计的典范.理论研究成果被认为是对国际地域建筑创作理论的延续与发展.

1 建筑气候分析技术

建筑与气候密切相关.在建筑方案设计中,充分考虑气候对设计各个环节的影响是提高建筑节能的前提,而准确确定室外气候条件与人体热感觉、室内微气候的关系是气候分析的关键.尽管行业内建筑师都具有初步的气候设计知识,但很少用于实践,主要原因是缺少简单、直观、实用、且能定量计算的气

候分析方法和工具.目前,国际上常用的建筑气候分析方法主要分为两大类:一类是图形分析方法,如Olgyay以及由此发展的Givoni的生物气候图^[2];另一类是以Mahoney为代表的表格分析方法^[3].这些分析方法都是从人体热舒适的角度分析当地气候特征,然后给出具体的被动式技术的选择原则.由于各国气候背景的差异,以及中国显著的地区气候差异,有必要针对我国气候特点研究建立中国建筑气候分析方法.

在研发气候分析技术之前,还需要解决3个最基础的科学问题:一个是对室外气候的认知,即从热舒适和建筑热环境设计的角度描述室外气候的典型特征和逐时变化;一个是舒适基准的确定,即人体在什么样的室内微气候条件下是舒适的,以及室外气候的变化是否会对人体热感觉产生本质影响;一个是不同的被动式技术可以调节的室外气候的区域和边界.归根结底是需要解决“人-建筑-气候”3个复杂系统的耦合作用问题,也是被动式低能耗建筑研究的难点.

与主动式控制技术相比,被动式技术的基本特点是:室内微气候与室外气候是随时交互作用的,并随室外气候的波动而做相应的规律性变化,呈现出显著的“自由运行状态”.因而,室内外空气就成为连接3个系统的分析主体,以此为依据,提出运用暖通空调工程领域常用的,描述空气性质的“空气焓湿图”^[4]作为建筑气候分析的底图工具(图2(a)).而从热环境设计目标来讲,人体热舒适是控制指标,因而可以同时描述空气性质和热舒适状态,由温湿度相组合的“有效温度”就成为联系“人-建筑-气候”3个系统的最佳指标参数.以焓湿图为底图,有效温度为变量,建立了建筑气候分析工具——建筑气候分析图(图2(b))^[1].横坐标为空气温度,纵坐标为空气湿度,由两点组成的“有效温度”,既可以描述室外气候条件,也可以表述室内气候的舒适程度,还可以表示气候与舒适的距离.纵横交错的虚线部分代表室外气候条件,红色线段代表特定地区的逐月气候,灰色区域代表人体热舒适区,也是建筑需要设计的总目标,实线围成的区域代表不同的被动式技术可以调节的气候区域.由图中可知,当室外气候落在实线区域时,则完全可以通过被动式技术获得舒适,实现零能耗.

2 室外气候的精细化表征方法

从建筑热环境和人体热舒适角度对室外气候特征进行准确的数学描述是建立建筑气候分析技术首

图1 被动式气候控制原理

Figure 1 Principle of passive climate control principle

图2 气候分析底图(a)和建筑气候分析图(b)

Figure 2 Climatic analysis base chart (a) and bio-climatic analysis tool (b)

先涉及的基础问题,也是进行低能耗设计优化的必备条件.与理论分析与数值模拟研究相比,我国对建筑节能领域的基础气象参数研究远滞后于国际发达国家水平.而又以2005年为分水岭,之前对室外气象参数的需求一直停留在稳态计算层面,逐月、逐日平均数据就可满足需求,而且数据覆盖台站少,1980年后未有更新,同时为建筑能耗模拟服务的精细化逐时数据处于空白,成为制约建筑节能行业发展的瓶颈.2005年,随着精确计算逐时能耗的动态设计方法被列为国家标准,研发准确描述室外典型气候逐时变化特征的气象年数据成为建筑节能的首要问题.

2.1 室外气候逐时变化表征方法

在此背景下,国内学者进行了大量基础研究,提出以美国 Sandia 国家实验室提出的典型气象年(TMY)为基本生成方法,考虑我国气象数据背景和建筑热环境需求,研发本土化的典型气象年的研究思路^[5-8].典型气象年是一个既要准确反映建筑能耗的逐时变化,又要能够以最少量的气象数据代表气候的典型变化,即做到精细化模拟与减少计算量的平衡是其技术难点.它是由12个均具有气候代表性的典型月(TMM)组成的一个“假想”的气象年^[9,10].每

一个典型月由逐时变化,且是真实记录的干球温度、露点温度、风速和水平面总辐射、直射辐射等若干影响能耗的关键气象要素构成,每个要素因对能耗和热环境的影响程度的不同而被赋予不同的权重^[11].

目前,我国记录气象数据的台站分为基准站、基本站和一般站,所记录的数据按时间精度分为逐时、4次定时和逐日数据.针对我国原始气象数据特征,需要解决系列数据处理问题:(1)逐日和定时观测数据的逐时化插值方法;(2)针对关键数据,如辐射、风速等,因缺测带来的建立各类气象数据的预测模型问题;(3)不同地区气象因子对能耗影响权重的选择问题;(4)为分析气候变化与建筑能耗的耦合关系,需要建立未来典型年的生成方法等.其中,对于周期性变化明显的干球温度、相对湿度和大气压的逐时化可采用3次样条方法,辐射数据处理方法将在下文中详细介绍.而对于随机变化的风速、风向以及云量等气象参数,建立保证精度的逐时化模型还没有突破.另外,由于中国气象台站的逐时化数据不能为其他行业领域所共享.今后长期存在的技术难点将是如何将日值的各类气象数据推导出满足精度需求的逐时数据.经过大量数据分析与能耗模拟研究,建立了我国典型气象年的生成方法,具体流程见图3.

2.2 太阳辐射因子的推测模型

太阳辐射是引起建筑光热反应、影响人体热舒适和建筑能耗不可或缺的气象参数,是构成典型年数据中最重要的气象参数。但与气温、气湿等常规气象参数相比,由于辐射观测站点数还不到基本地面观测站数的6%,致使辐射观测资料无论是平均尺度的日总辐射,还是精细化的逐时尺度,都极其匮乏,严重制约了低能耗建筑设计的发展。因而急需研究建立辐射数据的系统生成方法和日总辐射、直射辐射、散射辐射、逐时辐射等各类辐射数据的预测模型。

对于日总辐射的计算,常用模型计算方法或空间插值方法。模型计算方法是通过日照时数、云量等其他与太阳辐射密切相关的气象要素来估算太阳总辐射值。例如,利用日照辐射推测日总辐射的Angstrom-Prescott模型、利用云量和干球温度推测的张晴原模型。空间差值方法是利用已有的一定数量的空间样本,反应辐射数据的空间分布特征,然后据此预测未知地理空间的辐射特征。通过交叉验证法分析发现,在我国目前的辐射观测数据下,运用Angstrom-Prescott模型推测日总辐射值要优于空间插值法^[12]。

对于直射辐射和散射辐射的计算,国内外更多采用的是模型求解的计算方法。按照不同天气状态

下散射辐射在天空分布的不同,可以分为2类计算模型^[13],一种是各向同性散射辐射模型,如Orgill & Hollands模型^[14]、宇田川光弘模型^[15]、Collares-Pereira & Rabl模型^[16]、Erbs模型^[17]等;另一种是各向异性散射辐射模型,如Moon & Spencer模型^[18]、Steven & Unsworth模型^[19]等。各向同性散射辐射模型都采用晴空指数作为主要指标,根据晴空指数的大小确定天气状态,带入到相应的计算公式中;各向异性散射辐射模型主要是根据太阳散射辐射在空间分布特性的不同,构建不同情况的散射辐射微元后再积分求解得到。因各向同性散射辐射模型参数较少,参数物理意义明确,且容易求得,计算结果也比较准确,因此,该方法得到了普遍的应用和推广。

由于典型气象年是需要各要素的逐时数据,因此逐时的太阳辐射数据是必不可少的。对于逐时太阳辐射的计算一般主要有3种方法:一是理论计算法,根据太阳辐射穿越大气达到地面的传播物理过程,利用大气学、物理学等知识,输入详细的大气实际情况的参数进行数学推导计算^[20];二是统计模型法,主要是通过多年统计的常规气象数据以及相关的地理位置等信息,找出逐时太阳辐射与其之间的关系,进而推导出逐时太阳辐射值;如Collares-Pereira & Rabl模型^[16],该模型利用逐时太阳辐射和逐日太阳辐射之比与日落时角之间的关系来进行求解;三是人工神经网络方法,通过学习推广训练能力,建立非线性模型来进行模拟计算。如最小二乘支持向量机法^[21]。理论计算法虽然参数物理概念清晰,但是常规气象站不监测相关的大气参数,因而很难获得其准确值,限制了该方法的推广使用;统计模型法和神经网络法相比,2种方法各有侧重,通过验证发现,在我国目前的辐射观测数据下,2种方法结果差别不大^[22],但统计模型法计算过程相对简单,参数获取较容易,更易推广使用。

3 室内微气候与人体热舒适

室内微气候是由室内空气的温度、湿度、风速和周围表面辐射温度构成的,影响人体热舒适的小气候环境。环境的舒适与否由室内微气候与人体表面的换热平衡所决定,当由建筑创造的室内微气候越接近人体热舒适需求时,建筑就越舒适,同时也最节能。

2004年以前,国际建筑热环境设计标准一直遵循的是稳态热舒适理论,是由著名学者Fanger教授在

图3 典型气象年制作流程

Figure 3 Process of typical meteorological year

20世纪60年代所建立的. 其核心是在冬季和夏季, 建筑室内分别采用恒定的温度控制指标. 然而, 大样本量实地测试结果表明: (1) 建成环境的实际热舒适温度比标准设定的恒定温度值要宽广得多(图4); (2) 当人体处于舒适临界区时, 人体对自然变化的“动态”环境的接受度明显高于主动式控制环境. 为此, 如何完善稳态热舒适理论体系成为热舒适领域研究的焦点.

20世纪70年代末期, 以Humphrey^[23,24]为代表的国际学者提出了新的“热适应”理论, 认为人体对环境的变化具有“主动的”适应能力, 并且通过行为、心理和生理等各种调节方式对变化的环境产生热适应^[25,26], 使人体实际的热舒适范围比现行标准的预测结果宽广. 随后对大量现场测试结果的统计分析, 发现了室内舒适温度随室外平均温度变化的适应关系模型^[23], 奠定了“热适应理论”的基础. 从而将建筑热环境设计从“稳定、均匀、控制、耗能”的不可持续的“空调”设计方向, 引向建筑应尊重人体对“适度变化”环境的基本需求的“自然通风”设计方向, 进一步从热舒适理论层面, 支持了被动式超低能耗建筑设计理论. 这种同时考虑建筑的调节性能和人的主动适应能力的设计理念为建筑热环境和空调系统设计带来革命性的变革, 改变了基于机械调节的恒温环境的设计思维, 促进了建筑的可持续发展^[27].

图4 适应模型和预测模型^[28]

Figure 4 Adaptive and predicted comfort models^[28]

我国幅员辽阔, 气候多样, 社会经济背景和生活习惯等巨大的地区差异, 造成中国人群的热舒适需求既与国际人群显著不同, 还存在明显的地区差异, 因而热舒适标准既不能完全照搬国际标准, 也不能采用全国统一的温度指标标准. 通过对我国全部气候区25个城镇进行的室内微气候环境、人体主观热感觉与热舒适指标等测试和调查, 分析得到2万余份有效样本, 统计得到中国人群舒适温度随地域、季节的变化规律, 并建立了不同地区人体的热适应模型和舒适温度范围.

3.1 东部人群热舒适规律

我国东部地区经济发达、人口稠密, 受海洋气候影响, 气候湿润, 气温日较差和年较差均较小. 平均海拔低于1000 m, 气温垂直变化不大, 而主要受纬度影响, 从北向南依次为严寒、寒冷、夏热冬冷和夏热冬暖4个气候区, 温度成为反映该地区气候特征的主导因素. 运用热适应现场研究方法, 发现东部人群热舒适温度随室外平均气温呈现规律性的季节适应^[28], 而且人体对变化环境的适应敏感度与气温年较差负相关, 可接受温度范围与之正相关. 该地区热舒适温度的计算模型见表1.

3.2 西部人群热舒适规律

与东部相比, 除四川盆地外, 西部地区受大陆性气候影响深重, 辐射强烈, 干旱少雨, 气温年较差和日较差均较大. 各地区气候不仅受气温影响, 还与湿度和辐射显著相关, Humphrey基本适应模型显然不能准确反映气候对该地区人群热舒适的影响. 采用实验测试和数据回归分析发现, 温度和水蒸气分压力是影响西部人群热舒适感的关键参数, 进而建立了西部人群舒适温度的适应模型(表2), 该模型可以推广至大温差、强辐射的广大气候区.

表1 东部人群热舒适规律与舒适温度范围^{a)}

Table 1 Thermal comfort models and comfortable temperature range in eastern China

气候区	代表城市	气候适应模型	舒适温度范围(°C)
严寒地区	哈尔滨	$T_n = 0.12T_o + 21.49$	$16.3 < T_n < 26.2$
寒冷地区	北京	$T_n = 0.27T_o + 20.01$	$15.8 < T_n < 29.1$
夏热冬冷地区	上海	$T_n = 0.33T_o + 16.86$	$16.5 < T_n < 27.8$
夏热冬暖地区	广州	$T_n = 0.55T_o + 10.58$	$16.2 < T_n < 28.3$

a) T_n 和 T_o 分别为人体热舒适温度和室外月平均温度

表2 西部人群热舒适规律与舒适温度范围^{a)}

Table 2 Thermal comfort models and comfortable temperature range in western China

地域气候	代表城市	双变量气候适应模型	舒适温度范围(℃)
全年温和	昆明	$T_n=1.81+1.44T_0+0.06P-0.005T_0 \times P$	$15.8 < T_n < 23.6$
高原气候	拉萨	$T_n=14.53+0.27T_0+0.17P-0.01T_0 \times P$	$16.3 < T_n < 22.9$
干冷干热	吐鲁番	$T_n=83.01+7.39T_0-4.59P-0.26T_0 \times P+0.41T_0^2+0.06P^2$	$21.7 < T_n < 31.5$

a) T_0 为室外日平均温度,℃; P 室外日平均水汽压,0.1 hPa

3.3 农村人群热舒适规律

热舒适不仅受室外气候影响,同时也与室内环境密切相关.我国农村地区受经济条件的制约及生活习惯的影响,室内环境控制方式与城市存在较大差异(见表3).城市以主动式设备调节为主,建筑的自然调节为辅,农村地区则恰好相反.长期的环境适应使农村人群热舒适规律与城市居民显著不同.研究发现:(1)农村人群可接受的温度范围更广,对变化环境的适应能力更强,尤以冬季更为突出;(2)自然条件模式下,热舒适温度受室外气候影响大于室内微气候的影响.这些成果为建立农村建筑室内热环境设计标准奠定了科学基础和理论依据.

4 被动式设计技术

被动式设计的核心是利用建筑本体的空间布局、材料构造以及细部处理等方法将室内气候调节至人体舒适水平.冬季的太阳能辐射采暖和夏季的蓄热与夜间进行降温是2种最常用的被动式技术,也是节约常规能源的基本途径.为推广应用被动式技术,进行了被动式设计气候分区和设计计算方法方面的基础研究.

4.1 被动式气候分区

被动式技术的选用首先取决于室外的气候条件.为了明确特定地区是否适于采用被动式技术以及采用何种技术,需要对气候的共性与差异进行科学区划研究.

表3 农村与城市人群热适应规律比较^{a)}

Table 3 Comparison of thermal adaptive models between rural and urban residents

	代表地区	气候适应模型	舒适温度范围(℃)
农村	渭南	$T_n=0.63T_0+9.80$	$10.1 < T_n < 29.9$
城市	西安	$T_n=0.21T_0+20.48$	$16.0 < T_n < 28.2$

a) T_n 和 T_0 分别为人体热舒适温度和室外月平均温度

(i) 被动式采暖与降温区划.气候区划的重点是区划指标的选取,而对于不同的被动式技术,其室外气候的影响因素不同,涉及的建筑设计参数也不同.对于太阳能采暖来说,影响太阳能利用率的主要气候因素为室外空气温度和建筑的实际辐射得热量.过低的室外空气温度亦或是不充足的太阳辐射量均会导致偏低的太阳能利用率.对于夏季蓄热通风技术,除建筑的蓄热性外,其降温效率还取决于夜间室外空气是否足够清凉,以及是否有足够的风量与建筑蓄热材料进行充分的热交换.也就是说,影响降温效率的气候因素是室外空气温度和风速.

对于被动式太阳能采暖区划,选取了最冷月平均温度和综合辐射百分比分别作为一级和二级区划指标.依据最冷月平均温度把全国分为I~VI 6个一级分区.综合辐射百分比是指南向垂直面日总辐射量大于实际建筑模型南向垂直面所需的日总辐射量的天数与该月天数的比值.该指标能同时反映室外气候和建筑性能的综合影响,根据此指标将我国在6个分区的基础上细分为二级分区.对我国被动式太阳能采暖设计具有直接的指导意义(图5(a)).

对蓄热通风降温技术则选取降温的气候潜力指标气候降温潜力(CCP)^[29]作为区划指标.CCP是由Artmann提出的基于度日的概念,是指在给定气候条件下,当室内外温差大于理想蓄热模型降温所需的基本要求时(室内外温差大于3℃),该气候具有通风降温的潜力.分区结果见图5(b)^[30].

(ii) 综合设计气候分区.被动式气候分区的意图在于清晰、明了地告诉建筑师如何在建筑设计初期选择合适的被动式技术措施获得舒适的室内热环境.按照传统习惯,以平均气温>22℃为夏,<10℃为冬来划分四季^[31],我国除了东北北部、两广中南部、青藏高原海拔4500 m以上地区,以及南海诸岛和昆明地区以外,其余地区均表现为夏热冬冷、四季分明的气候.一年中的冬季和夏季都会对人体热舒适产生不利的影响,被动式设计也必须同时考虑冬夏两季

图5 被动式太阳能采暖设计分区图(a)和被动式蓄热通风降温分区(b)^[30]

Figure 5 Passive solar heating design zones (a) and passive nocturnal ventilation with thermal mass cooling zones (b)^[30]

的影响,这种考虑有2种反向季节影响的气候设计比仅有一季影响的要复杂.因而,气候分区也应是协调冬季的太阳能采暖和夏季的被动式降温的综合气候分区,这样对指导被动式设计才更加有效.

由于需要综合考虑冬夏影响,气候分区采用了一级区划和二级区划相结合的方式.一级区划考虑冬季影响,将太阳能采暖利用率作为一级区划指标;二级区划考虑夏季影响,由于空气温湿度不同组合,在夏季带来干热、干冷2种气候类型和不同的被动式技术,二级区划指标的确定相对复杂.通过对自然通风、蓄热通风和蒸发冷却等主要的被动式降温技术与气候关系的分析,定义了“不舒适度指标”作为二级分区指标,不舒适指标分为不舒适热指标和不舒适湿指标,其中不舒适热指标是指全年温度中超过中性温度的时间比;不舒适湿指标是指全年中含湿量超过12 g/kg的时间比.根据以上分区方法全国共分为9个气候区,每个分区适宜的被动式设计策略见图6^[1].

4.2 被动式太阳能采暖设计计算方法

利用太阳能作为采暖替代能源,是降低建筑能耗的最佳途径.我国西部,尤其是高原地区,太阳能极其丰富,但因为一直缺乏成熟的太阳能利用工程设计方法和地方技术标准,现有建筑太阳能利用效率较低,室内热环境舒适度普遍不高.因此,如何规范化的推广被动式太阳能建筑,为建筑师提供简便易行的被动式太阳能采暖设计计算方法就成了当务之急.

图6 被动式综合设计气候分区^[1]

Figure 6 Passive integrated design climate zones^[1]

(i) 被动式太阳能建筑耗热量计算. 对于建筑节能领域来说,为每个地区设定经济可行的建筑节能目标是首要问题.目前,国家行业标准采用建筑物耗热量指标对每个地区的建筑物设定了节能目标值,即单位面积建筑物的设备使用能耗不超过标准规定的目标值.而节能目标的确定既要起到引领节能新技术的作用,又要考虑技术经济的可行性.现行国家建筑节能行业设计标准一直关注节约了多少人工环境控制设备使用能耗,因而,室外计算条件为冬季最不利气候的阴天条件,辐射影响是被忽略的.显然,该计算方法不适用于被动式太阳能采暖建筑.通过寻找室外气候条件,城乡居住建筑物理环境和能耗指标的相关关系,经统计回归发现,太阳能建筑的耗热量指标不仅与太阳辐射强度密切相关,而且与室内外温差有直接关系,即同时受这2个因素的综合影响.从而提出了辐射度日比指标(最冷月太阳辐射强度 I 与采暖期日数 Hdd 之比)作为计算耗热量指标的关键参数,计算方法见算下式:

$$Q = -0.74(I/Hdd)^2 + 0.63(I/Hdd) + 11.5. \quad (1)$$

(ii) 被动式太阳能建筑节能率计算. 这个方法已作为我国太阳能极其富集的西藏高原地区居住建筑节能设计标准编制时确定节能目标值的基本方法^[32,33].建筑物节能率是与建筑的实际耗热量相对的一个概念,当耗热量越大,建筑的节能率就越小.我国现行居住建筑节能设计标准规定,建筑物节能率是指采用节能技术后,建筑物耗热量与20世纪80年代通用建筑耗热量相比,节约的能耗与通用建筑能耗的比值.为了与国家标准相衔接,被动式太阳能采暖建筑也采用节能率的概念,但计算方法却有本质区别.对于太阳能采暖建筑,其节能率与太阳能的实际贡献率密切相关.太阳能贡献率越大,需要设备辅助的那部分能量越小,进而建筑越节能.因而,太阳能采暖建筑节能率计算引入了“辅助耗热量”作为节能率的判定指标.辅助耗热量大小与建筑采用太阳能集热构件的集热效率正相关,即取决于直接受益窗、集热蓄热墙和附加阳光间等技术设计方法;同时与建筑的采暖负荷负相关,取决于建筑围护结构的热工性能参数.通过对太阳能建筑的大量测试及动态模拟分析,提炼出反映被动式太阳能建筑集热系统性能参数(solar energy saving, SES)和太阳能建筑负荷特征参数(solar gain, SG),并在此基础上提出

了被动式太阳能采暖建筑辅助耗热量指标的计算方法,见算式(2).该方法同样可作为被动式太阳能采暖建筑热工性能评价的简化计算方法:

$$E_{\text{aux}} = \frac{(1-\text{SES})(t_n - t_e)}{A_0} \text{SG} \cdot X_m A_g C, \quad (2)$$

式中, E_{aux} 为被动式太阳能建筑的辅助耗热量指标,即除被动式太阳能采暖系统提供热量外,单位建筑面积由其他辅助供暖设备提供给建筑的热量; A_0 为设计建筑的建筑面积; t_n 为室内设计计算温度; t_e 为采暖期室外平均温度, $^{\circ}\text{C}$; A_g 为太阳能集热系统中集热窗的面积; X_m 为集热系统的有效透光面积系数; C 为集热窗玻璃的污垢遮挡系数.

4.3 被动式蓄热通风降温设计计算方法

建筑蓄热与夜间通风相结合的降温技术是有效降低空调能耗、减轻城市热岛的被动式技术.该技术利用建筑的隔热蓄热性能储存夜间凉风中的冷量,降低房间的基础室温和平均辐射温度,通过减小室温波动,实现室内外高温错峰出现,以节约能源并提升建筑的舒适性.针对我国大陆性主导气候引起的大部分地区夏季昼夜温差大的气候资源优势,运用实验测试与理论分析相结合的方法,揭示了夜间通风降温技术的规律特性,提出了简化的热工设计计算方法,为推广应用该技术提供了基础理论支撑.

(i) 蓄热通风计算模型. 方案设计阶段,研究建立快速、简洁且准确的简化计算方法是运用推广被动式技术的基础环节.蓄热通风技术涉及热环境和风环境的耦合过程,影响其降温效率的关键因素包括室外气象条件、建筑空间的蓄热通风布局、围护结构的隔热蓄热性能以及蓄热体与周围空气的对流换热效率.因此对其实际降温效果的准确预测非常复杂,目前主要采用流体力学与传热学的耦合数值模拟来完成.这种分析技术对于方案阶段的设计师来讲,几乎难以掌握,从而制约了其在工程中的应用.通过分析蓄热通风的传热过程和流体动力学基础,建立了获得降温通风量和蓄热量的简化计算方法(式(3)和(4)),实现了在建筑设计阶段对该技术的定量分析.

$$G_{\text{req}} = \frac{3.6Q_{\text{max}}}{c\rho(T_i - T_0)}, \quad (3)$$

$$Q_i = [T_{\text{mass}, i-1} - T_{\text{out}, i}] \times A_{\text{mass}} \times h_{\text{mass}}, \quad (4)$$

式中, G_{req} 为带走蓄热体最大时刻蓄热量所需要的通

风量; c 为空气的比热; T_i 为排出空气温度; T_0 为进入空气温度. Q_i 为 i 时刻蓄热体蓄存的热量,蓄热量的最大值用 Q_{max} 表示; $T_{\text{mass}, i-1}$ 为 $i-1$ 时刻蓄热体表面温度. $T_{\text{out}, i}$ 为 i 时刻室外空气温度; A_{mass} 与 h_{mass} 分别为蓄热体表面积和蓄热体表面换热系数.结合热压及风压通风换气量的计算公式,就可以确定某地区夜间通风降温的效果以及所需烟囱高度和开口面积等设计参数,从而进行有效的蓄热通风设计.

(ii) 蓄热体对蓄热通风效果的影响. 蓄热通风降温技术的第2个关键是蓄热体设计,其位置、数量及布置方式对降温效果影响明显.按照位置分布,蓄热体分为外部蓄热体、内部蓄热体和附加蓄热体.研究发现:(1)在实际建筑中,外部蓄热体对室内温度和热舒适感受影响十分有限,而内部蓄热体对室内热环境影响效果显著;(2)内部附加蓄热体的面积差异对室内热环境影响显著,然而蓄热体面积的增加与室内温度的降低并不是呈线性变化,当蓄热体面积增加到一定程度时,室内温度降低幅度越来越小,进而建立了内部蓄热体面积(x)与室内舒适时间比(y)之间的关系:

$$y = 0.0887 \ln x + 0.613. \quad (5)$$

5 西部被动式超低能耗建筑设计实践

快速的城镇化进程中,西部地区建筑环境恶化、建筑能耗骤增、地域建筑文化失传的现象愈来愈严重,运用被动式技术设计创建与西部不同自然和社会条件相适宜的,既具有地域特征、又节能节地、且满足热环境质量并富有现代气息的绿色建筑模式和相应构造体系,以推动西部地区人居环境的可持续发展,这也是国际地域建筑学的热点和前沿问题.

近10年来,研究团队运用现代建筑环境科学的原理和方法,在诠释中国传统民居生态建筑经验,分析地区气候资源和环境条件的基础上,提出了“着力改善围护结构热工性,优先发展被动式技术,然后以主动式设备系统做补充”的地域超低能耗建筑的“层次”设计原则,并在陕西、宁夏、四川等地区设计建造了结构安全、功能便利、气候适宜、成本经济、环境舒适、节能生态、且具有地域风貌的超低能耗示范工程.在详细分析当地气候条件的基础上(图7),总结当地建筑设计创作的具体内容见表4.对建成建筑的实验测试与调查评价显示,示范建筑均达到了在非采暖空调状态下满足当地居民的基本热舒适需求,

图7 气候分析. (a) 延安地区; (b) 银川地区; (c) 成都地区
Figure 7 Climatic analysis. (a) Yan'an; (b) Yinchuan; (c) Chengdu

实现了“零”能耗建筑示范. 这种工程示范起到了对被动式低能耗建筑良好的推广作用.

6 启示与建议

被动式超低能耗建筑设计理论随着社会可持续发展的需求而发展, 并将持续成为绿色建筑学研究的的前沿问题, 以上在我国西部开展的地域低能耗建筑研究与实践给我们的启示是:

(1) 实践证明, 结合地域气候的被动式低能耗建筑不仅是经济可行的, 而且最具有节能潜力的领域, 同时也是维系和传承我国地域建筑文化的重要方法, 因此应在开展新型可替代能源、研发新型高效节能单项技术与建筑部品等研究热点的同时, 大力发展被动式超低能耗建筑设计理论研究.

(2) 未来低能耗建筑将向“高效、零耗”方向发展, 被动式超低能耗建筑将是绿色节能建筑的基本内涵. 近年来, 欧美等国际区域, 对自然气候资源最大化利用技术、被动式节能技术综合高效优化设计方法, 自

然气候调节模式下的人体自适应机理及其应用技术研究不断加强. 欧洲提出了“零能耗”建筑设计技术标准, 美国能源部设立了适应性热舒适研究专项, 旨在最大限度地提升建筑的能效水平. 鉴于被动式技术的地域性本质属性, 研究建立基于中国社会技术经济、地域气候资源环境背景的被动式超低能耗建筑理论体系和标准应用是当前领域研究的重点.

(3) 被动式建筑设计是一个复杂约束条件下的优化组合过程, 既需要考虑自然气候条件与人体热舒适的基本需求, 又要考虑社会文化背景和技术经济条件, 还要兼顾地域文化传承和生态环境的发展, 最后通过建筑空间、平面与材料构造等要素体现. 因而, 建立被动式超低能耗建筑设计理论体系首先需要解决人在被动式控制环境下的热舒适需求规律、被动式建筑设计室外计算条件, 以及被动式采暖、通风、降温技术的具体设计方法和技术参数等基础科学问题, 研发能够协调考虑人-建筑-气候3个系统的现代建筑节能设计方法.

表 4 西部被动式超低能耗建筑设计实践

Table 4 Design practice of passive ultra-low energy architectures in western China

项目	陕西新型窑居太阳房 ^[34]	银川咸富桥生态民居 ^[35]	四川大坪村灾后生态民居 ^[36]
气候环境	延安位于陕西省北部，冬长夏季短，干旱少雨，气温日较差大。年平均温度 9.7℃，1 月和 7 月平均气温分别为 -6.7℃ 和 22.9℃，年降雨量 550 mm；日照充足，年日照时数 2472 h	咸富桥距银川市约 9 km，年平均气温 8.5℃ 左右，四季分明，昼夜温差大，干旱少雨，气候干燥，年平均降水量为 200 mL 左右，日照充足，年日照时数为 2800~3000 h	大坪村位于四川省彭州市通济镇，距成都约 65 km，海拔 805~2484 m。气候温和，年平均气温 13℃ 左右，最高为 7 月，约为 22.1℃，最低为 1 月，约为 2.4℃；雨量充沛，年降雨量为 1250 mm 左右
气候分析	图 7(a)	图 7(b)	图 7(c)
现状分析	(1) 室内潮湿，通风不畅，空气质量差； (2) 室内采光均匀度差； (3) 原有窑洞空间形式单一，不能满足现代生活需求	(1) 建筑围护结构保温性能差，冬季室内温度过低； (2) 多为土坯房，窗户面积小，通风采光差	(1) 建筑围护结构热工性能差，室内湿度大，结露严重，冬季室内温度过低； (2) 室内采光均匀度差； (3) 抗震性能差
经验汲取	传统窑洞由于覆土或靠山，室内热稳定性好，有着冬暖夏凉的优良特性，且就地取材对周围环境影响小	屋顶抹草泥——梁承檩，檩上再铺一层荆条，荆条上铺一层秸秆，然后刷和好的泥灰的构造做法，就地取材，冬暖夏凉	传统民居为穿斗木构架体系，围护结构为抹泥竹笆墙，房屋重量轻以及柔性的木结构承重体系使得传统民居具有良好的抗震性能得以在大地震中幸免
应对策略	被动式太阳能+自然通风	被动式太阳能+自然通风	被动式太阳能+自然通风
构造优化	(1) 防水：采用新型防水技术，并使得窑顶绿化成为现实； (2) 保温：北窗面积尽可能减小，采用双玻并设置外保温。	保温：利用草砖作为墙体保温材料；聚苯乙烯泡沫塑料板作为屋顶保温	(1) 结构体系：沿用传统的穿斗式木框架结构，在材料选取上提供 2 种方案，木结构体系和木-轻钢结构； (2) 墙体构造：双层竹板或木板，中间填充聚苯乙烯泡沫板或草泥
方案体现	(1) 太阳能采暖：不同户型分别采用直接受益式、集热蓄热墙式以及附加阳光间式的太阳房方案。实施后太阳能利用率达到 40% 以上，采暖节能率达 70% 以上； (2) 自然通风组织：利用地沟通风，达到除湿通风目的； (3) 自然采光设计：利用错层解决后部采光、通风问题	(1) 太阳能采暖：在南向设置直接受益窗和附加阳光间；体形系数控制在 0.3 以下，将卫生间、厨房等次要功能空间布置在北侧，形成“温度缓冲区”； (2) 自然通风组织：村落的整体布局采用错落布置的方式，增大夏季迎风面积；住区道路避免南北对开，避开冬季寒冷的北风	(1) 太阳能采暖：在正房中采用直接受益式、附加阳光间，有效改善冬季室内热环境； (2) 自然通风组织：平面设计以及门窗布局充分考虑自然通风，通过模拟分析发现，夏季 90% 时间内室内热环境可满足基本热舒适需求； (3) 自然采光设计：注重房间开间、进深和窗户的比例，室内采光得到了极大的改善，整个建筑室内采光系数平均值达 38.66%

参考文献

1 Yang L. Climatic analysis and architectural design strategies for bio-climatic design (in Chinese). Doctor Dissertation. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2003 [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]

2 Givoni B M. Climate and Architecture. 2nd Ed. London: Applied Science Publishers, 1976

3 Koenigsberger O H, Ingersol T G, Alan M, et al. Manual of Tropical Housing and Building. London: Longman, 1980

4 Tian Z B. Air Condition (in Chinese). Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1993 [田忠宝. 空气调节. 西安: 西安交通大学出版社, 1993]

5 Zhang Q Y, Yang H X. Meteorological Data Standard Manual for Architecture in China (in Chinese). Beijing: China Architecture and Building Press, 2012 [张晴原, 杨洪兴. 中国建筑用标准气象数据手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012]

- 6 Meteorological Library of China Meteorological Information Center, Department of Building Science of Tsinghua University. Special Meteorological Data for Architectural Thermal Environment Analysis in China (in Chinese). Beijing: China Architecture and Building Press, 2005 [中国气象局气象信息中心气象资料室, 清华大学建筑技术科学系. 中国建筑热环境分析专用气象数据集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005]
- 7 Liu J P, Yang L. Foundational Scientific Research on Architecture Energy Efficiency Design (in Chinese). Technical Report, Xi'an University of Architecture and Technology. 2007 [刘加平, 杨柳. 建筑节能设计的基础科学问题研究报告. 技术报告, 西安建筑科技大学. 2007]
- 8 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
- 9 Yang L, Li C H, Liu J P. Generating method of typical meteorological years and quality analysis of raw meteorological data (in Chinese). *Meteorol Sci Technol*, 2006, 34: 596–599 [杨柳, 李昌华, 刘加平. 典型气象年生成方法及原始气象数据质量分析. *气象科技*, 2006, 34: 596–599]
- 10 Joseph C L, Sam C M H, Apple L S C. A statistical approach to the development of a typical meteorological year for Hong Kong. *Archit Sci Rev*, 1996, 39: 201–209
- 11 Hall I, Prairie R, Anderson H, et al. Generation of Typical Meteorological Years for 26 SOLMET Stations. Technical Report, Albuquerque, 1978, SAND78-1601
- 12 Liu D L, Yang L, Wang W Q. Comparison research on total solar radiation models (in Chinese). In: *Architecture Physics Branch of Architecture Society of China, eds. Urbanization in Architecture and Urban Physical Environment*. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2008 [刘大龙, 杨柳, 王稳琴, 等. 太阳总辐射模型对比研究. 见: 中国建筑学会建筑物理分会, 主编. 城市化进程中的建筑与城市物理环境. 广州: 华南理工大学出版社, 2008]
- 13 Yao W X, Li Z R, Zhao Q, et al. Comparative study on accuracy of several diffuse radiation models (in Chinese). *J Tongji Univ (Nat Sci)*, 2014, 6: 937–943 [姚万祥, 李峥嵘, 赵群, 等. 几种散射辐射模型精度的对比. *同济大学学报(自然科学版)*, 2014, 6: 937–943]
- 14 Orgill J F, Hollands K G T. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. *Solar Energy*, 1977, 19: 357–359
- 15 Zhang Q Y, Huang J. Meteorological Standard Database for Architecture in China (in Chinese). Beijing: Mechanical Industry Press, 2004 [张晴原, Huang J. 中国建筑用标准气象数据库. 北京: 机械工业出版社, 2004]
- 16 Collares-Pereira M, Rabl A. The average distribution of solar radiation correlation between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Solar Energy*, 1979, 22: 155–164
- 17 Erbs D G, Klein S A, Duffie J A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy*, 1982, 28: 293–302
- 18 Moon P, Spencer D E. Illumination from a non-uniform sky. *Trans Illum Eng Soc*, 1942, 37: 707
- 19 Steven M D, Unsworth M H. Standard distributions of clearsky radiation. *Q J Roy Meteorol Soc*, 1977, 103: 457
- 20 Fu B S, Chen W M, Ma L. The computations of solar direct and diffuse radiations over China by using MODTRAN 3 (in Chinese). *J Nanjing Inst Meteorol*, 2001, 1: 51–58 [傅炳珊, 陈渭民, 马丽. 利用 MODTRAN 3 计算我国太阳直接辐射和散射辐射. *南京气象学院学报*, 2001, 1: 51–58]
- 21 Su G L, Liu Q H, Deng F P, et al. The hourly global clear sky radiation model based on the least squares support vector machines (in Chinese). *J Beijing Normal Univ (Nat Sci)*, 2007, 3: 274–278 [苏高利, 柳钦火, 邓芳萍, 等. 基于 LS-SVM 方法的晴空逐时太阳辐射模型. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2007, 3: 274–278]
- 22 Kevin 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
- 23 Humphreys M A. Outdoor temperatures and comfort indoors. *Build Res Pract*, 1978, 6: 92–105
- 24 Humphreys M A. Field studies of thermal comfort compared and applied. *J Inst Heat Vent Eng*, 1976, 44: 5–27
- 25 de Dear R J. A global database of thermal comfort field experiments. *ASHRAE Trans*, 1998, 104: 1141–1152
- 26 de Dear R J, Brager G S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy Build*, 2002, 34: 549–561
- 27 Yang L, Yan H Y, Joseph C L. Thermal comfort and building energy consumption implications—A review. *Appl Energy*, 2014, 115: 164–173
- 28 Mao Y. Study on climate adaptability of human beings to thermal comfort in China (in Chinese). Doctor Dissertation. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2006 [茅艳. 人体热舒适气候适应性研究. 博士学位论文. 西安: 西安建筑科技大学, 2006]
- 29 Artmann N, Manz H, Heiselberg P. Climatic potential passive cooling of buildings by night-time ventilation in Europe. *Appl Energy*, 2007, 84: 187–201
- 30 Qi X L, Yang L, Liu J P. The applicability of night ventilation on office building in north China (in Chinese). *ACTA Energ Solaris Sin*, 2011, 32: 669–673 [齐晓琳, 杨柳, 刘加平. 北方地区办公建筑夜间通风适用性分析. *太阳能学报*, 2011, 32: 669–673]

- 31 GB50178-93 Standard of climatic regionalization for architecture (in Chinese). Beijing: China Architecture and Building Press, 1993 [中华人民共和国建设部, 国家技术监督局. GB50178-93 建筑气候区划标准. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993]
- 32 Xi'an University of Architecture and Technology. Design Standard for energy efficiency of residential buildings in Tibet (DB 54/0016-2007) (in Chinese). Lhasa: 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]
- 33 Yang L, Zhu X R, Liu Y F, et al. Review of design standard for energy efficiency of residential buildings in Tibet autonomous region (in Chinese). J HV & AC, 2010, 40: 51–54 [杨柳, 朱新荣, 刘艳峰, 等. 西藏自治区《居住建筑节能设计标准》编制说明. 暖通空调, 2010, 40: 51–54]
- 34 Liu J P, He Q, Yang L, et al. The new generation of Yaodong cave dwelling in Loess Plateau (in Chinese). Archit Cult, 2007, 6: 39–41 [刘加平, 何泉, 杨柳, 等. 黄土高原新型窑居建筑. 建筑与文化, 2007, 6: 39–41]
- 35 He Q, Liu J P, Lü X H. Appropriate technologies of ecological architecture for the rural areas in the northwest China—Village Jianfuqiao design of city Yinchuan as an example (in Chinese). Build Sci Res Sichuan, 2009, 35: 243–247 [何泉, 刘加平, 吕小辉. 西北农村地区的生态建筑适宜技术——以银川市碱富桥村设计为例. 四川建筑科学研究, 2009, 35: 243–247]
- 36 Liu J P, Cheng H, Zhou W, et al. Post-disaster reconstruction of village Daping in Tongji town of Pengzhou city—Creative research on low-carbon settlement in rural areas (in Chinese). Const Sci Technol, 2010, 9: 38–43 [刘加平, 成辉, 周伟, 等. 彭州市通济镇大坪村灾后重建——低碳乡村生态聚落创作研究. 建设科技, 2010, 9: 38–43]

Fundamental research and practice of passive and ultra-low energy consumption buildings

YANG Liu, YANG JingJing, SONG Bing & ZHU XinRong

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

This represents a multi-task topic, because it involves several challenges arising from indoor environmental quality, building energy efficiency, and vernacular culture inheritance. Although China is proud of its vast territory and resources, it has experienced pressure from a low per-capita share of resources owing to its large population. A vulnerable ecological environment has stimulated the increase and improvement of environmentally friendly and energy-saving buildings. It is essential to inherit the vernacular culture during development of a sustainable habitat environment, rather than modifying it by building new but identical or even wacky architecture. This is an effective and widely-applicable approach to solving the above challenges, through adopting passive technology in building ultra-low energy consumption buildings. As a flexible approach, passive technology has excellent applicability in meeting demands of the environment, energy resources, and vernacular culture. This paper introduces a systematic study of passive design for ultra-low energy buildings. According to existing theory of passive design, the following two key aspects in the application of passive technology were addressed in the work. First, the feasibility of using outdoor climatic resources was investigated, to determine their upper and lower limit conditions for indoor heating and cooling, respectively. The second aspect is the development and optimization of building design strategies with the use of passive technology, to effectively use the heating and cooling capacity of outdoor climate. The fundamental concept of passive and ultra-low energy building design was conducted from these two aspects. The critical and most valuable contribution of this research is the reduction of building energy consumption by decreasing the demand for artificial heating and cooling facilities. This can be achieved by effectively narrowing the difference between human thermal comfort and outdoor climate, and enlarging the climatic interval size that the passive design technology is able to control. Regarding the practice of passive and ultra-low energy consumption buildings, through a combination of theoretical, experimental, *in-situ* and statistical analyses involving multiple disciplines such as architecture, building climatology and building environment engineering, we determined the regular pattern of human thermal comfort under natural climate fluctuation. We also developed a bioclimatic analysis tool based on the human thermal comfort demands, and climatic zones for passive design were defined accordingly. A thermotechnical calculation for passive solar heating design and a simplified indoor temperature calculation for nocturnal ventilation are proposed. These capabilities can quantitatively analyze problems in the “Human-Architecture-Climate” system. The proposed concepts and theories have been successfully applied to Western China, the Loess Plateau, an arid area of northwest Yinchuan, and the Sichuan earthquake zone. This work spreads the knowledge of passive technology and provides flagship models for further study.

habitat environment, passive design, ultra-low energy consumption building, energy efficiency, Western China, sustainable development

doi: 10.1360/N972015-00058