

基于原型思想的极端干旱气候乡土建筑气候适应研究

何文芳^{1,2}, 郑何山¹, 刘承桦¹, 刘加平^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710054; 2. 西部绿色建筑国家重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 基于原型思想, 以极端干旱气候的吐鲁番乡土建筑为研究对象, 通过归纳乡土建筑原型, 从人体动态环境需求与气候适应能力提升典型经验、被调节空间与热调节空间对气候逐级衰减的普遍规律、多层围护结构材料构造实现气候适应性能共性特征三个方面, 解析乡土建筑气候适应型, 探寻乡土建筑、人与极端干旱气候和谐共生关键智慧, 服务当今低碳建筑发展。

关键词: 乡土建筑; 原型; 气候适应性; 吐鲁番; 干旱气候

中图分类号: TU986.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)06-0838-09

Study on climate adaptation of vernacular building in extreme arid climate based on archetype

HE Wenfang^{1,2}, ZHENG Heshan¹, LIU Chenghua¹, LIU Jiaping^{1,2}

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

2. State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an 710055, China)

Abstract: On the basis of archetype theory, this research takes Turpan vernacular architecture in extremely arid climate as the research object. By summarizing the prototype of vernacular architecture, this research analyzes the climate adaptation type of vernacular architecture from three aspects: the typical experience of improving human dynamic environment demand and climate adaptability, the general law of gradual attenuation of climate by regulated space and thermal regulation space, and the common characteristics of multi-layer enclosure material structure to realize climate adaptability. On the basis of the constructed prototype, this research further investigates the key wisdom of harmonious coexistence between vernacular architecture, human being and extremely arid climate, in the hope of serving the development of low-carbon architecture today.

Key words: vernacular building; archetype; climate adaptability; Turpan; arid climate

当今能源短缺、环境污染、气候变化已成为全球危机, 寻求解决方法是许多研究领域的主题。乡土建筑作为“没有建筑师的建筑”, 已经被证实能够在极少使用暖通空调设备的条件下, 为人类提供可接受的热湿环境, 展现出良好的气候适应性能与可持续发展潜力^[1]。

“凡是较优秀的个体建筑或者组群, 一条街道或者一个广场, 往往都以建筑物形象重复与变化的统一而取胜。说是千篇一律, 却又千变万化”^[2], 同一地域的乡土建筑往往形态上千变万化、百花齐放, 类型上则千篇一律、和谐统一。尽管千变万化的形态中积累了丰富多样的气候适应策略^[3-7], 然而当代社会生活需求、材料建造技术等带来建筑形态巨大变迁, 原有策略对新建建筑的适用性

备受制约, 为此深入理解千篇一律的类型背后, 乡土建筑应对气候的普遍规律, 即气候适应原型, 成为探寻当代建筑、人与气候和谐共生智慧的关键。

我国干旱气候(Arid climate zones with desert and cold arid)主要分布在新疆南部、甘肃、青海和内蒙古西北部等西北边缘地带^[8], 其中吐鲁番盆地是极端干旱气候代表地区^[9], 这里夏季过热问题突出, 素有“火州”之称, 当地乡土建筑蕴含着应对干旱气候的丰富经验。然而吐鲁番盆地在民用建筑热工设计分区中分属于寒冷气候B区^[10], 新建建筑设计侧重冬季保温防寒, 长期忽视夏季防热问题, 造成夏季建筑环境品质下降, 制冷能耗攀升。为此本文以极端干旱气候为例, 在归纳该地

收稿日期: 2022-11-01

修改稿日期: 2022-11-15

基金项目: 中国工程院战略研究与咨询项目(2022-XZ-38); 国家重点研发计划项目(2019YFD1100900); 陕西省教育厅重点项目(20JS080)

第一作者: 何文芳(1984—), 女, 博士, 副教授, 主要研究绿色乡土建筑、建筑传热学。E-mail: hwfang@xauat.edu.cn

区乡土建筑原型基础上,从人体气候适应需求出发,探索乡土建筑运用空间与实体营造适宜环境的典型经验,提炼建筑气候适应原型,量化气候适应性能,为传统气候适应智慧继承与优化发展提供依据。

1 乡土建筑原型

荣格心理学中“原型”是放之四海而皆准的典型人类经验,建筑原型是特定区域、特定人群建造的所有建筑的共同类型选择和表现特征^[11]。极端干旱气候条件下,乡土建筑原型是该地人群主动应对恶劣气候的类型化选择,是提炼气候适应原型的基石。

自公元1世纪,吐鲁番盆地历经西汉高昌壁、高昌郡、高昌国、唐代西州、高昌回鹘等历史时期,至1318年高昌故城在战火中被毁,又连续被察合台汗国、准噶尔汗国和中国清政府所统治,在汉文化、高昌回鹘文化、伊斯兰文化相继主导影响下,吐鲁番乡土建筑逐渐成熟完善,形成独具风貌的建筑原型。

1.1 空间

吐鲁番盆地夏季酷热冬季寒冷,先民们为了抵御恶劣的气候,很早便确立的独立式、穿套式和内廊式三类空间原型^[12]。除了用于辅助用房的独立式,后两类空间原型均将房间分为“外室”和“内室”两个层次,其中外室通常作为辅助用房,兼具连接入口与内室的交通功能。内室为主要用房,基于伊斯兰文化对居住私密的重视,内室的空间属性独立封闭且功能复合多元,居民足不出户便可完成起居、餐饮、炊事、休憩和礼拜等日常活动^[13-14]。为此内室常同时设置火炕、炕桌和用于烹饪的火炉等设施,有时还保留一面不设门、窗、洞口的完整西墙,便于面向圣地麦加礼拜,见图1(a)~(c)。

随着伊斯兰文化影响的深入,《古兰经》《福乐智慧》《突厥语大词典》等著作以及喀喇汗王朝、赛依德王朝等时期的法律条文,推动吐鲁番乡土建

筑的空间原型成熟完善。一方面,节庆婚丧等礼仪要求细化了居住空间功能,产生了用于重要家庭活动的“正房”居住单元(维吾尔语译为“沙拉依”),与普通三间穿套式空间原型不同,其面宽增加至五间。中间一间为外室(代立兹);左侧客室(米玛哈那)面宽两间,是迎宾待客的主要场所,装饰华丽考究;右侧餐室(阿西哈那)主要用于节庆设宴时招待女宾客,也作为冬季举家日常起居的场所^[15]。另一方面,产生了中庭(阿以旺)、高架棚、檐廊(辟希阿以旺)、高台(苏帕)、种植庭院(哈以拉)等满足生活起居功能需要的半室外和室外空间^[16],形成丰富多样的建筑空间类型,见图1(d)。

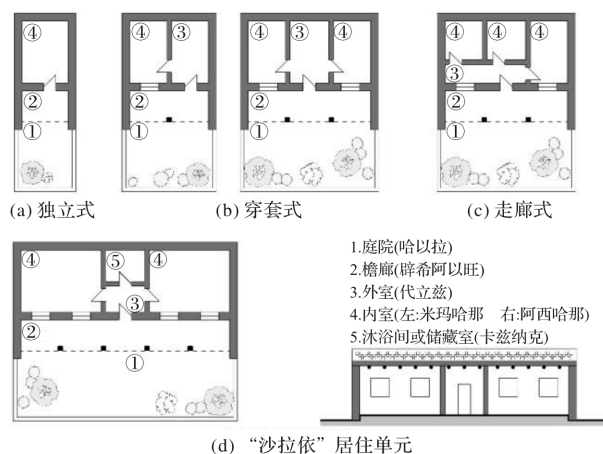


图1 极端干旱气候乡土建筑空间原型

Fig. 1 Spatial prototype of vernacular buildings in extreme arid climate

1.2 实体

吐鲁番盆地绿洲面积有限且建筑材料匮乏,乡土建筑用材以土为主、木材为辅。根据高昌回鹘时期高昌故城、交河故城,以及麻扎古村等遗址考察发现,该地乡土建筑很早便确立了“土拱窑洞”实体原型,出现地上窑洞、下沉窑洞和靠山窑洞等多种形式^[17-18]。窑洞采用厚重密实的土壤围护,具有很好的蓄热控温效果,是先民顺应极端干旱气候的实体选择,见图2(a)。

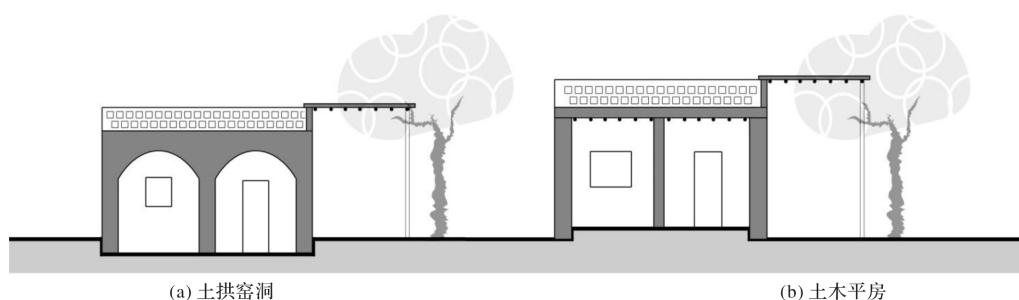


图2 极端干旱气候乡土建筑实体原型

Fig. 2 Prototype of vernacular buildings in extreme arid climate

此外,先民们还运用木材搭建木屋架,产生了木屋架与生土墙体共同承重的“土木平房”实体原型,不仅形成厚土墙、小格窗、平屋顶等地域建筑风貌特征,还被用于营建开敞的高架棚、阿以旺、辟希阿以旺等半室外空间,将生活空间由室内延伸至室外,见图2(b)。

1.3 组合

回应不同的资源条件、地形地貌和经济技术发展水平,在剖面上,乡土建筑以“土拱窑洞”和

“土木平房”实体原型为基础,形成“下窑上屋”、“靠山退台”两种剖面组合形式。其中“下窑上屋”多为双层,首层采用半下沉的土拱窑洞结构,上层则采用土木结构;“靠山退台”仅在少量山地可见,呈现多层退台形式。

在平面上,乡土建筑以半室外中庭或高架棚为中心,三类建筑空间原型围绕其灵活组合,形成“一”形、“折”形、“凹”形、“对称”形四种平面组合形态,以此拓展对场地环境的适应性,见图3。

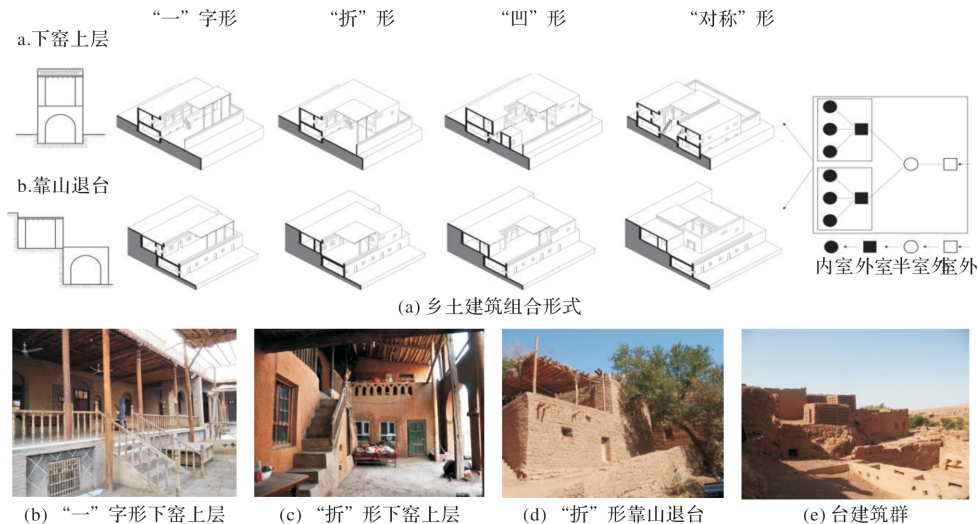


图3 极端干旱气候乡土建筑组合类型

Fig. 3 Combination type of vernacular buildings in extreme arid climate

2 动态需求提升气候适应能力

适者生存是生物界不变法则,建造建筑是人类适应气候的重要方式,因此建筑的气候适应性追本溯源,始于人的气候适应需求。古有春赏百花秋望月、夏沐凉风冬踏雪的生活意趣,气候环境四季更替,人的需求亦动态变化,建造多样空间类型满足不同时节环境需求,是我国传统建筑惯用手法。

吐鲁番居民采取动态聚居生活方式,使用“冬房”“夏房”和半室外三类核心空间,分别应对严寒、酷暑和过渡时节环境需求。“冬房”为冬季的核心生活场所,通常布置在某个或多个地上内室,远离建筑出入口,空间围合封闭保温,通常开启火炉、火炕采暖,采暖面积约占总面积的37.75%^[19];“夏房”是夏季白天气温较高时的核心生活场所,部分家庭将其与冬房合用,但条件允许的情况下,居民更倾向于使用地下窑洞,利用地下壁面低温营建舒适环境,有时开启电扇或空调降温,降温面积占比约为25.1%;春、秋过渡季节和夏季早、晚气温较低时,高架棚、中庭、檐廊等半室外空间常作为核心生活场所,相对于封闭的室

内,半室外空气流速区间1.0~2.0 m/s,人体对流和蒸发散热量较大,且便于利用夜间低温散热。

这些满足居民环境需求,且被长时间高频率使用的核心生活场所,称为“被调节空间”。而其他低频率使用的建筑空间,包括室外庭院、所有的建筑外室、以及低频使用时段的半室外空间,称为“热调节空间”,见图4。

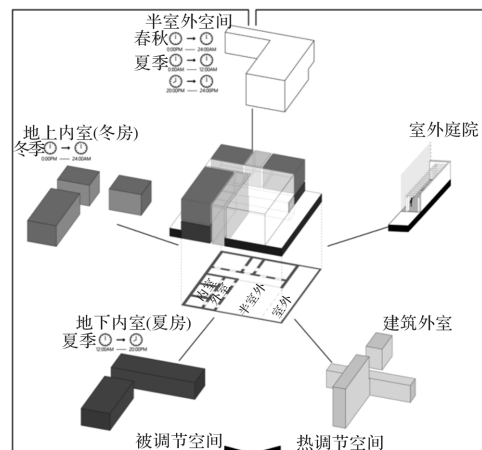


图4 多样建筑空间类型与人体动态气候适应

Fig. 4 Diverse building space types and human dynamic climate adaptation

“冬房”“夏房”“半室外”三类被调节空间拥有迥异的气候资源属性。前两者属性内向封闭,分别依赖采暖设施、地冷能源营造适宜热湿环境,厚重的生土围护结构和极小的窗洞设置将其与室外极端气候隔绝,室内空气流速极低,难以实现自然通风。依据国际标准 ASHRAE55—2017^[20],通过 Climate Consultant 软件气候分析,分别确定冬房、夏房中的人体舒适区间,即 Adaptive Comfort 模式下焓湿图中区间1(Comfort),舒适时长约1 045 h,占全年时间的11.9%。

图5区间7(Adaptive Comfort Ventilation)为人体在室内空间的适应性热舒适范围。根据吐鲁番地区调查分析结果,相比室内,人体在“半室外”具有更强的热适应能力,能接受更宽的热环境范围,其中期望风速达2.05 m/s,可接受温度范围扩大至19.7~34.7℃^[21],因而舒适时长从1 288 h提升至2 650 h。可见,室内、外多样空间类型动态聚居,渗透着吐鲁番居民主动应对极端气候的毅力和智慧,见图5。

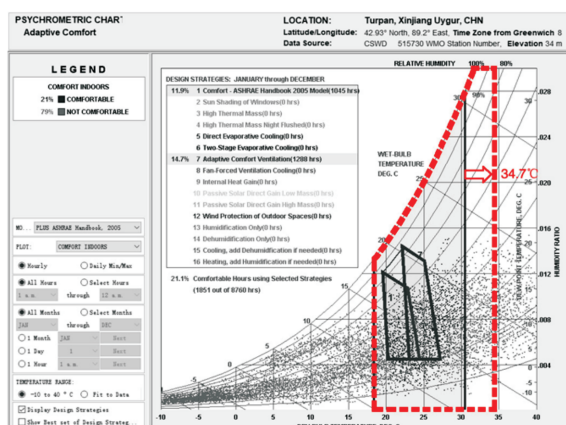


图5 人体气候适应能力提升

Fig. 5 Improvement of human climate adaptability

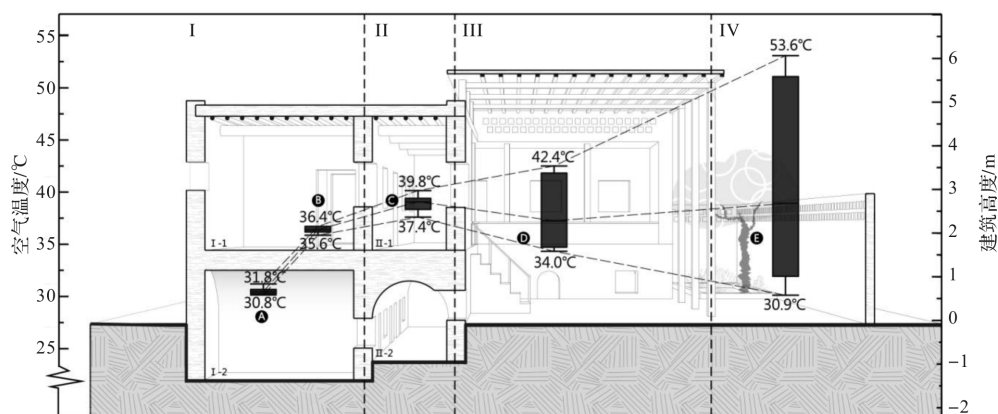
3 递进空间承载气候适应策略

建筑是满足人类社会生活需要的物质空间环境,建筑的气候适应归根结底,是通过空间和实体应对气候,最大限度地降低矿物质能源依赖和实现满足人体需求的物理环境。吐鲁番居民的核心生活场所,包括作为“冬房”“夏房”的建筑内室和高架棚、檐廊等半室外空间,因此当地乡土建筑气候适应原型的核心,是营建满足需求的三类核心场所环境。

针对典型样本的实测结果显示,极端气候条件下,室外、半室外、外室等多样的热调节空间将被调节空间层层包裹,形成对极端气候的逐级衰减,为被调节空间营建舒适环境,见图6。

夏季极端高温向被调节空间“夏房”热传递的过程中,经历了“室外庭院→半室外→地上(外室+内室)→地下(外室+内室)”四层空间的逐级衰减,环境温度呈现显著的梯度下降特征见图6(a)。其中,室外庭院承载蒸发降温 and 增湿策略,调节院落微气候;半室外空间承载遮阳和通风策略,白天削弱太阳辐射影响以降低环境最高温度,夜间引入室外低温空气降低环境最低温度;建筑外室承载围护结构蓄热策略,主要贡献于削峰填谷以减小温度波幅;地下窑洞承载无限厚土壤的高质蓄热策略,提取地冷能源以降低平均温度。

冬季被调节空间“冬房”位于地下和地上的建筑内室A和B,为火炉、火炕取暖工况,极端气候向“冬房”渗透寒冷的过程中,经历了“室外+半室外→外室(地上+地下)→内室(地上)→内室(地下)”四层空间的逐级衰减,环境温度呈现显著的梯度提升特征见图6(b)。



(a) 夏季

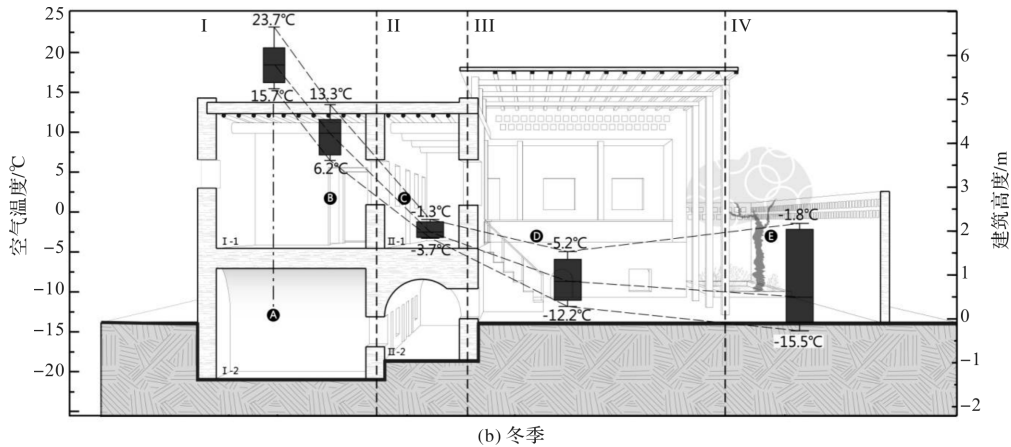


图6 极端气候随空间逐级衰减

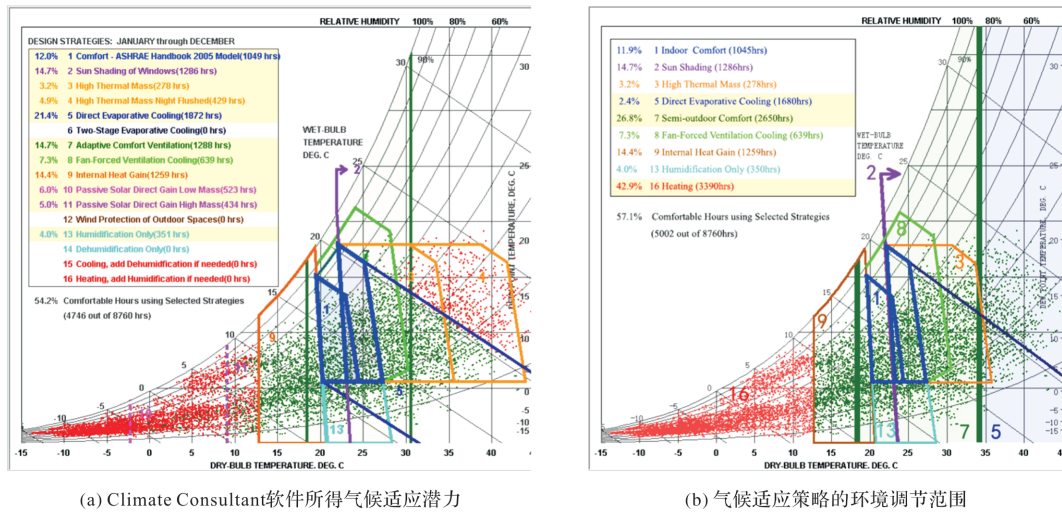
Fig. 6 Gradual attenuation of extreme climate with space

其中,建筑外室承载高热质蓄热策略和“门斗”保温策略,提升环境平均温度,减小温度波动,兼顾减少冷风渗透;建筑内室承载内部得热和高热质蓄热策略,提升环境平均温度,同时减少热能损失。

不难发现,吐鲁番乡土建筑空间成为气候适应策略的载体,从开敞通透的室外庭院,到顶部界面限定的半室外,到六面围合的外室,再到内

向封闭的内室,空间序列层次分明、循序渐进,气候适应策略也随空间有序排布。

将“冬房”“夏房”“半室外”人体热舒适区间与气候适应策略绘制到焓湿图中,得到各类气候适应策略的环境调节范围见图7(b),与气候软件分析结果相比,吐鲁番乡土建筑对夏季强太阳辐射和干旱气候的适应性能更强,但对冬季寒冷气候的适应性能较弱,如图7所示。



(a) Climate Consultant软件所得气候适应潜力

(b) 气候适应策略的环境调节范围

图7 吐鲁番乡土建筑的气候适应性能

Fig. 7 Climate adaptation performance of Turpan vernacular architecture

(1)图7(a)显示了Climate Consultant软件所得各项气候适应策略的环境调节潜力,由于建筑核心场所多为室内空间,因而气候策略调节范围均在室内舒适区基础上拓展。其中窗户遮阳、高热质蓄热、自然通风、夜间通风、蒸发降温、增湿等气候适应策略,可有效缓解夏季干热环境,内部得热、被动式太阳能集热与蓄热策略可一定程度的调节冬季寒冷环境^[22]。但仍有7.1%的时间需要主动设备制冷,另有38.7%的时间需要主动

设备采暖。

(2)“冬房”作为吐鲁番居民冬季的核心生活场所,承载着内部得热策略,由于炊事、照明及人体散热较大,沿用气候软件分析结果,有效时长近似1 259 h,占全年时长的14.4%。此外“冬房”常布置在地上的内室空间,厚墙、小窗的特点导致被动式太阳能采暖利用不足,因而冬季采暖时长达3 390 h,占比42.9%。

(3)“夏房”承载高质蓄热、风扇通风和遮阳策

略。由于常布置在地下内室,生土围护结构和地下土壤蓄热性能好,半室外、外室等热调节空间将其层层包裹,遮阳良好,但室内通风不畅,难以实现夜间通风降温,且依赖风扇设施增加人体对流散热,因而遮阳策略的有效时长等同图7(a)中的区间2(1 286 h, 14.7%),高质蓄热的有效时长等同图7(a)中的区间3(278 h, 占比3.2%),风扇通风则等同图7(a)中的区间8(639 h, 占比7.3%)。

(4)自然通风、蒸发降温等策略不再由室内空间承载,而是布置在半室外和室外空间中,相应的气候调节范围在半室外舒适区基础上拓展。由上文可知,在自然通风工况下,人体室外舒适温度范围为 $19.7\sim 34.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,因而自然通风策略调节范围即为半室外舒适区,有效时长2 650 h,占比

26.8%;又由于人体在室外空间中的环境需求,突破了在室内静风情况下的湿度限制,即最大水蒸气分压力14 mmHg和最大湿球温度 $21.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[23],因而通过合理种植果树、布局蓄水浇灌,蒸发降温策略的有效时长可提升至1 680 h。

4 多层围护保障气候适应性能

如果说吐鲁番乡土建筑的空间是气候适应策略的载体,那么围合、分隔、限定空间的围护结构即为气候适应策略的实体形式。建筑的气候适应性能,最终取决于材料选择和构造方式。依据“内室→外室→半室外→室外”空间递进顺序,衰减极端气候的围护结构应包括封闭、半封闭、开敞三个层次,其位置与构造如图8所示。

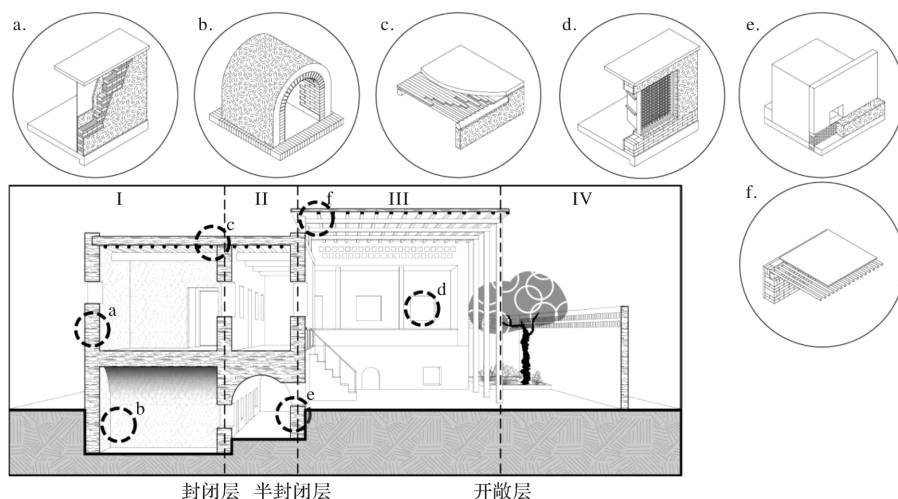


图8 极端干旱气候乡土建筑的多层次围护结构

Fig. 8 Multi-layered enclosure structure of vernacular buildings in extreme arid climates

封闭层即围合建筑内室的围护结构,内室可作为冬房、夏房等恶劣气候时长期停留的核心生活场所,是远离建筑入口的建筑用房,因此封闭层围护结构属性封闭,无直接对外的门窗,仅在顶部或背墙留有极小的洞口换气,最大程度阻隔了极端气候对核心生活空间的影响;半封闭层是围合建筑外室的围护结构,外室是位于建筑入口处的辅助功能空间或交通空间,是连接主要功能用房和室外空间的“桥梁”,因此半封闭层围护结构属性半封闭半开敞,冬、夏极端气候条件下门窗关闭以削弱气候的影响,过渡时节则开启门窗将温和气候引入室内;开敞层是围合高架棚、檐廊等半室外空间的实体与洞口,与地域气候直接相连,因而属性开敞通透。

依据文献可依次确定实体材料导热系数、比

热容、密度等热工性能参数^[24],以及门窗空气渗透量、换气量等气密性能参数^[25],计算得到多层次围护结构的热工性能指标,透明围护结构传热系数 $4.7\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ^[26],单位面积渗透量 $7.5\sim 9.0\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,非透明围护结构传热系数范围 $1.11\sim 2.02\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,总热惯性指数 $2.74\sim 7.17$,如表1所示。相对而言,寒冷B区城市居住建筑围护结构热工设计要求、外窗传热系数 $1.5\sim 1.8\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,单位面积渗透量 $3.0\sim 4.5\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,非透明围护结构传热系统 $0.30\sim 0.35\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。实体围护热物理参数详见表1。

可见吐鲁番乡土建筑围护结构的蓄热性能较好,热惯性指数明显高于城市建筑,利于应对干旱气候较大的温度波动。然而受到建筑材料、建

造技术与经济等条件的限制,其绝热性能远低于
现行的城市居住建筑标准,为此采用封闭、半封
闭、开敞三层次围护结构,可有效弥补单层围护
结构热工性能不足,更好的阻隔极端气候侵扰。

表 1 极端干旱气候乡土建筑气候适应性能
Tab. 1 Climate adaptation of vernacular buildings in extreme arid climate

温度梯度	空间载体	气候策略	实体围护				
			材料构造	传热系数 $W/(m^2 \cdot K)$	总热惯性 指数	气密性	层次
I 级 温度 梯度	I-1 地上内室 (冬房)	高热质蓄热					封闭层
		内部得热	覆土屋面 200~300 mm	1.11~1.26	2.74~3.93	-	
		火炉采暖	土坯墙 400~600 mm	1.37~1.79	4.92~7.17	-	
	I-2 地下内室 (夏房)	地冷能源	土拱楼面 400~500 mm	1.72~2.02	4.50~5.63	-	
		高热质蓄热	夯土地面	1.72	4.50	-	
		内部得热				-	
II 级 温度 梯度	II-1 地上外室	采暖/制冷					半封 闭层
		高热质蓄热	覆土屋面 200~300 mm	1.11~1.26	2.74~3.93	-	
		保温	土坯墙 400~600 mm	1.37~1.79	4.92~7.17	-	
	II-2 地下外室	地冷能源	土拱楼面 400~500 mm	1.72~2.02	4.50~5.63	-	
		高热质蓄热	夯土地面	1.72	4.50	-	
		保温	木框单玻窗	4.7	-	7.5~9.0 m ³ /(m·h)	
III 级 温度梯度	半室外	遮阳	覆土屋面 50~100 mm	1.46~1.59	0.95~1.54	-	开敞层
		自然通风	花格通风墙	-	-	-	
IV 级 温度梯度	室外庭院	蒸发降温 加湿	花草种植、蓄水	-	-	-	-

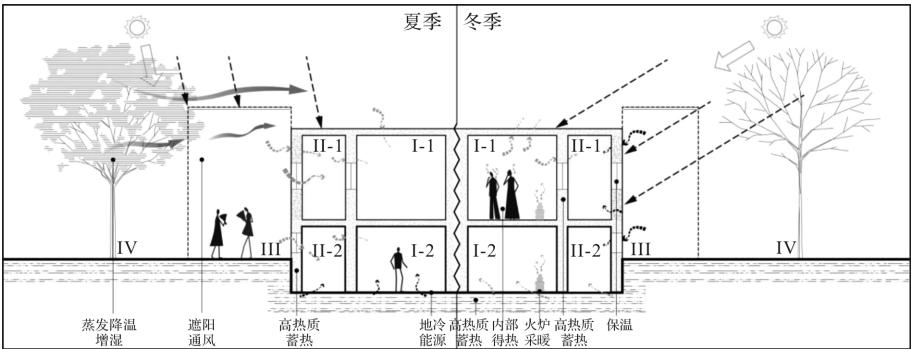


图 9 极端干旱气候乡土建筑气候适应原型图示

Fig. 9 Illustration of climate adaptation prototype of vernacular architecture in extreme arid climate

5 结语

吐鲁番盆地为代表的极端干旱地区太阳辐射强、冬季干冷、夏季干热,采用单一气候适应策略难以有效抵御极端气候侵扰,然而多样的气候策略对建筑空间与实体要求各异,有时甚至相左,兼顾不易。例如自然通风、夜间通风策略要求建筑增加开口面积,而高热质蓄热、内部得热策略则要求建筑封闭保温;遮阳策略要求对建筑窗口、墙体、屋顶等构件尽可能少接收太阳辐射,而被动式太阳能采暖策略要求恰好相反。

该地区乡土建筑的气候适应建立在多类型空

间和土、木实体的基础之上,首先从人体动态气候适应需求出发,划分出多样的被调节空间和热调节空间,从根本上提升人体气候适应能力;其次以“冬房”“夏房”“半室外”三类核心场所的环境营建为目标,采用“室外→半室外→外室→内室”递进空间序列,分类承载气候策略以协调多样策略矛盾,形成对极端气候影响的逐级衰减,并扩大策略的气候调节范围;最后运用封闭、半封闭、开敞三层次围护结构,弥补单层围护结构热工性能不足,保障建筑气候适应性能,实现建筑空间、实体设计与气候适应高度融合,见图 9。

反观当代城市建筑,常常采用高性能集成围

护结构或附加建筑构件、部品、主动设备等,调和策略矛盾以应对气候。例如智能控制遮阳百叶、LOW-E真空玻璃、断桥保温门窗、装配式集热蓄热墙、蒸发冷却空调、地源热泵等。由于仅以室内空间为核心场所,气候适应策略常以成品技术形式呈现,采用外围护结构为载体,但与功能空间关系疏离,这是造成传统认知将“建筑气候适应”简单等同于“建筑设计+技术策略”,设计与技术“两张皮”的重要原因。

值得注意的是,吐鲁番乡土建筑气候适应原型是在传统农牧文明约束下建立的,在低能源消耗的同时顺应了极端干旱气候,对当今建筑可持续发展具有借鉴意义,但其适用性亦有不足之处:

(1)该原型立足于小面积、少时段用能的节约型生活方式,要求建筑功能空间设计划分出边界清晰的核心使用空间,这与我国建筑常见的开敞、流通的空间设计迥异;

(2)该原型依赖多样的热调节空间组织气候适应策略,特别是室外和半室外空间对炎热气候的调节意义重大,这种方式较适用于空间成本较低的村镇地区,而在寸土寸金的发达城市区域较为受限;

(3)该原型对冬季严寒气候的适应性能较低,由于以土、木围护结构的绝热与密闭性能较差,尽管户均采暖面积不足 40.69 m^2 ,但用能强度达 $59.2 \text{ kgce}^{[19]}$,远高于北方城镇居住建筑用能水平。为此新建建筑不宜盲目追求地域风貌,在条件允许的情况下,合理应用现代建材与建造技术,提升围护结构热工性能。

参考文献 References

- [1] ZHANG Yufeng, LING Jin. Thermal comfort in interior and semi-open spaces of rural folk houses in hot-humid areas[J]. Build Environ, 2018, 128:336-347.
- [2] 梁思成. 梁思成全集第五卷(千篇一律与千变万化)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2001:379-381
LIANG Sicheng. The fifth volume of Liang Sicheng's complete works (the same and ever-changing) [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001: 379-381
- [3] LIU Jiaping, WANG Lijuan, YOSHINO Yasuko, et al. The thermal mechanism of warm in winter and cool in summer in China traditional vernacular dwellings [J]. Build. Environ., 2011, 46(8):1709-1715.
- [4] ZENG Zhiwei, LI Li, PANG Yue. Analysis on climate adaptability of traditional villages in Lingnan, China-world cultural heritage site of Majianglong Villages as example [J]. Procedia Engineering, 2017, 205: 2011-2018.
- [5] CHI Fang'ai. The strategies and effectiveness of climate adaptation for the thousand pillars dwelling based on passive elements and passive spaces[J]. Energy & Build, 2019, 183:17-44
- [6] 何文芳,白卉,刘加平. 吐鲁番地区夏季民居热舒适测试研究[J]. 太阳能学报,2014,35(6):1092-1097.
HE Wenfang, BAI Hui, LIU Jiaping. Research on thermal comfort test of residential houses in Turpan area in Summer[J]. Acta Solar Sinica, 2014, 35(6): 1092-1097.
- [7] 何文芳,刘加平,师宏儒. 基于“移居”生存的维吾尔民居热环境营造[J]. 建筑科学,2016,32(4):54-59.
HE Wenfang, LIU Jiaping, SHI Hongru. Thermal environment construction of Uyghur dwellings based on “immigrant” survival[J]. Building Science, 2016, 32(4):54-59.
- [8] BECK H E, ZIMMERMANN N E, MCVICAR T R, et al. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1 km resolution[J]. Scientific Data, 2018(5):180-214.
- [9] 陈洁,罗智星,杨柳. 建筑节能设计用于干旱气候区气候特征分析[J]. 城市建筑, 2019, 16(28):48-51.
CHEN Jie, LUO Zhixing, YANG Liu. Building energy-saving design for analysis of climate characteristics in arid climate areas[J]. Urban Architecture, 2019, 16(28):48-51.
- [10] 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[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of People's Republic of China. Code for thermal design of civil buildings: GB 50176—2016 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2016.
- [11] 刘洋. 基于原型思想的建筑空间创作观[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
LIU Yang. Concept of architectural space creation based on prototype thought [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [12] 严大椿. 新疆民居[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1995
YAN Dachun. Residential houses in Xinjiang [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1995
- [13] KUCUKERMAN O. Turkish house in search of spa-

- tial identity[M]. Istanbul: Temel Printing; 1991: 69, 203.
- [14] OZAY Nazife. A comparative study of climatically responsive house design at various periods of Northern Cyprus architecture[J]. Building and Environment, 2005, 40: 841-85.
- [15] 阿兹古丽·艾山. 喀什维族住宅建构文化与特色研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2010.
- AZGUL Aishan. Research on construction culture and characteristics of Uyghur Houses in Kashgar [D]. Urumqi: Xinjiang University. 2010.
- [16] 艾妮雅·买买提. 文化与自然——维吾尔传统生态伦理研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2003.
- AIDIYA Maimaiti. Culture and nature: Research on U-yghur traditional ecological ethics [D]. Urumqi: Xinjiang University. 2003.
- [17] 田小红, 王永强, 佟文康, 等. 高昌故城第五次考古发掘简报[J]. 吐鲁番学研究, 2012(2): 1-34.
- TIAN Xiaohong, WANG Yongqiang, TONG Wenkang, et al. Briefing on the fifth archaeological excavation of Gaochang Ancient city[J]. Turpan Studies, 2012(2): 1-34.
- [18] 陈震东. 新疆民居[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- CHEN Zhendong. Residential houses in Xinjiang [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009
- [19] 袁岫. 吐鲁番维吾尔民居节能优化策略研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
- YUAN Qi. Research on energy-saving optimization strategy of Uyghur residential buildings in Turpan [D]. Xi'an; Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2016.
- [20] ASHRAE. Thermal environmental conditions for human occupancy: Standard 55-2017[S]. USA, Atlanta; Atlanta Refrig and Air-Conditioning Engineers, 2017.
- [21] CHANG Sha, HE Wenfang, YAN Haiyan, et al. Influences of vernacular building spaces on human thermal comfort in China's arid climate areas[J]. Energy & Build, 2021, 244(8).
- [22] 何泉, 何文芳, 杨柳, 等. 极端气候条件下的新型生土民居建筑探索[J]. 建筑学报, 2016(11): 94-98.
- HE Quan, HE Wenfang, YANG Liu, et al. Exploration of new-type native residential buildings under extreme climate conditions [J]. Architectural Journal, 2016(11): 94-98
- [23] WATSON D, LAB K. Climatic design: Energy-efficient building principles and practices[M]. Newyork: McGraw-Hill, 1983.
- [24] 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[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- Ministry of Housing and Urban-Roural Pevelopment of People's Republic of China. Code for thermal design of civil buildings; GB 50176—2016 [S]. Beijing: China Architecture Publishing & Media Co. Ltd., 2016.
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 建筑外门窗气密、水密、抗风压性能分级及检测方法: GB/T 7106—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Sapervison, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Airtightness, watertightness, and wind pressure resistance performance classification and testing methods of exterior doors and windows of buildings; GB/T 7106—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [26] LI Huixing, ZHANG Ran, FENG Guohui, et al. The test and analysis of air tightness for zero energy building in cold region [J]. Procedia Engineering, 2016 (6): 381.

(编辑 吴海西 沈 波)