

重庆场镇民居室内热湿环境实测分析

赵一舟¹, 单军¹, 张弘¹, 刘可¹

(1. 清华大学, 北京, 100084)

摘要: 本文以重庆场镇民居室内热湿环境为研究内容, 选取重庆三倒拐场镇典型民居为现场实测样本, 开展各季节多空间、多参数集成实测, 重点从波动性、多样性、梯度性和 APMV 达标率等方面对典型民居不同季节、不同空间室内热湿环境进行量化分析和综合评价, 并从时间(昼夜/季节)、空间(水平空间/竖向空间)两个维度阐述其热湿环境特征与差异, 揭示了吊层空间、阁层空间以及竖向空间组织对于民居室内热湿环境的重要影响。进而从热湿环境营造角度, 提出适用于该地区的建筑气候适应性设计策略建议。

关键词: 重庆场镇民居; 热湿环境; APMV; 气候适应性; 竖向空间

1 引言

1.1 研究背景与内容

近年来, 随着建筑物理环境实测手段的进步与丰富, 民居室内物理环境的量化研究和科学评估成为当前绿色建筑和乡土建筑的研究重点^{[1][2]}。然而既有研究往往以民居热湿环境呈现结果分析为主, 缺乏对热湿环境整体特征及其与空间关联性的综合分析, 缺乏不同民居、不同季节、不同空间的量化比较分析。

本文以重庆场镇民居室内热湿环境为研究内容, 选取三倒拐场镇两栋典型民居为研究案例, 通过物理环境量化指标实测及 APMV 计算, 重点从波动性、多样性、梯度性和 APMV 达标率等方面对各民居不同季节、不同空间室内热湿环境进行量化分析和综合评价, 并从时间(昼夜/季节)、空间(水平空间/竖向空间)两个维度分析了热湿环境舒适等级差异, 并试图基于热湿环境特征提出该地区民居气候适应性设计策略建议。

1.2 研究对象概况

重庆三倒拐场镇民居位于重庆市东北部长寿区内, 是“中国历史文化名街”15强, 也是重庆市内少数典型的纵向沿江场镇。三倒拐场镇南临长江, 东临桃花溪, 东西两侧为山谷缓坡而下。在地域气候上, 重庆地区夏季湿热且高温期长; 冬季湿冷, 但相较于寒冷地区温度相对温和; 过渡季较为温和适宜; 全年高湿, 且过渡季和冬季湿度更高。日照率低, 天空云层覆盖率高, 宏观风速低, 静风率高, 但山地微气候及立体地方性风场作用明显。

2 研究方法

2.1 实测仪器

测试组运用无线测试设备对典型民居进行了一年的数据采集, 并于各季节典型期进行了多次实地监测。测试涉及的物理环境参数包括室内外空气温度、相对湿度、风速、风温。测试仪器及主要参数见表1。

基金资助: 国家重点研发计划项目课题 1 “基于建筑文化传承的西部地域绿色建筑学理论与方法”

(项目编号: 2017YFC0702401)

作者简介: 赵一舟(1988-), 女, 北京, 博士在读, email: zhaoyz15@mails.tsinghua.edu.cn

表1 测试仪器及参数

仪器名称	仪器型号	仪器参数
温湿度自记仪	天建华仪 WSZY-1B	范围：温度-40~100℃；湿度 0~100%RH 分辨率：温度 0.1℃；湿度 0.1%RH
壁挂温湿度记录仪	天建华仪 BWSY-1B	范围：温度-40~100℃；湿度 0~100%RH 分辨率：温度 0.1℃；湿度 0.1%RH
Ibem	清华大学 Ibem	范围：温度-40~100℃；湿度 0~100%RH 分辨率：温度 0.1℃；湿度 0.1%RH PM2.5: $\pm 0.001\text{mg}/\text{m}^3$ CO2: $\pm 3\%$ or $\pm 50\text{ppm}$ 照度: 0.01~10,000lx; 0.1~100,000lx
无线万向风速风温记录仪	天建华仪WWFWZY-1	量程:温度 -20~80℃；风速 0.05~30m/s 分辨率：温度0.01℃；风速0.01m/s

2.2 实测民居与测点布局

选取两栋典型民居 C、民居 D 开展实测研究，各测点布置如图所示：

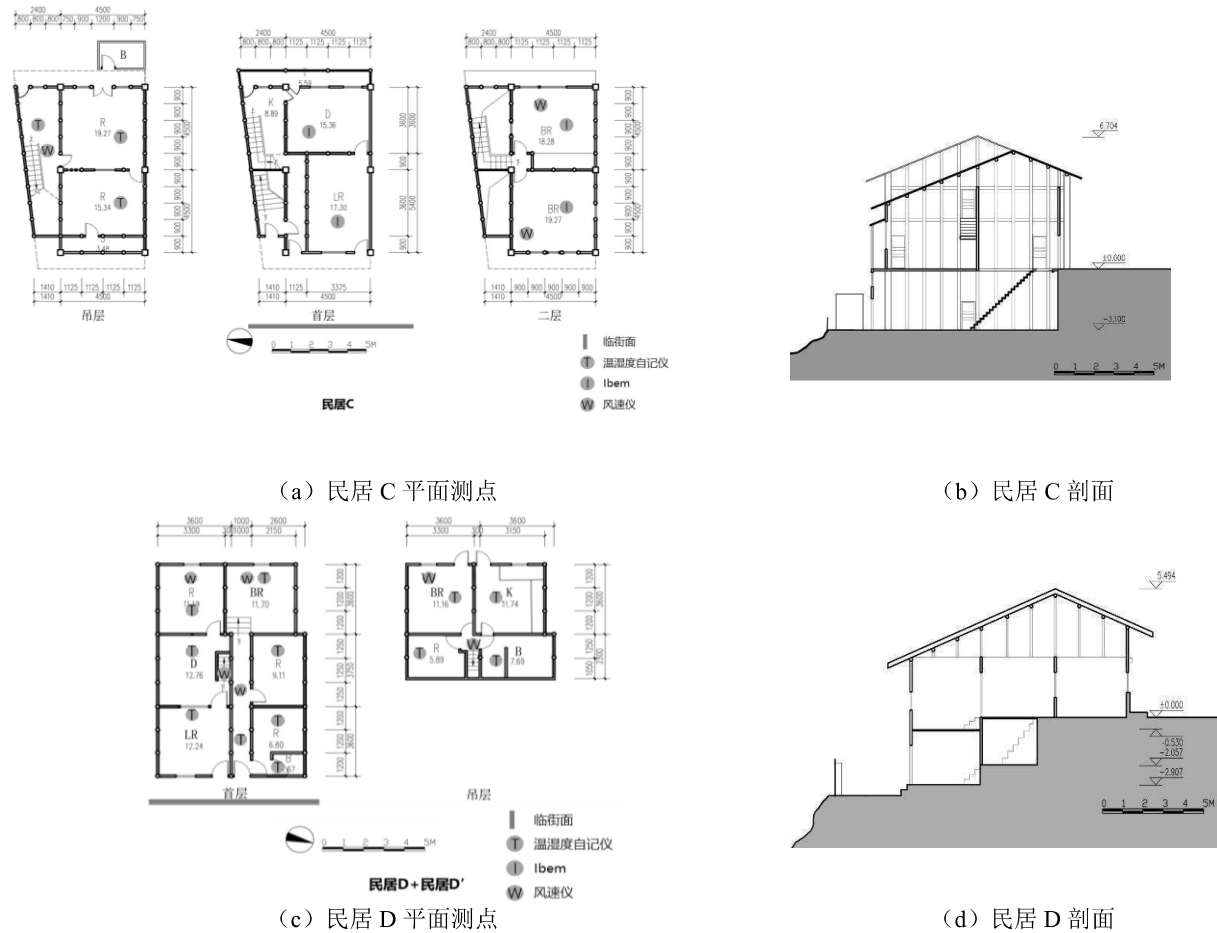


图1 民居 C、D 测点布置图

3 实测结果与分析

3.1 波动性分析

分别选取民居 A 和民居 B 不同季节室内温湿度极值变化范围与室外温度进行比较，温湿度为各典型房间测点综合值，以此分析民居室内整体温湿度变化（图3，图2）。

3.1.1 温度分析

夏季、过渡季、冬季典型日期间，建筑室内最高温度和最低温度变化范围随室外温度具有明显

的波动性。过渡季的波动略小于夏季和冬季。民居 C 由于综合了二层（温度偏高）和吊层（温度偏低），室内整体温度变化范围大于单层建筑，且在各个季节均有超出室外变化的部分。民居 D 夏季和过渡季室内温度变化范围基本小于室外温度变化，但冬季室内温度变化整体比室外温度变化偏高。

3.1.2 相对湿度分析

夏季室内整体相对湿度变化范围略高于室外相对湿度变化，过渡季和冬季则略低于室外相对湿度变化。民居 C 由于综合了二层（相对湿度偏低）和吊层（相对湿度偏高），室内整体相对湿度变化范围大于单层建筑，且有超出室外变化的部分。多层民居在夏季和过渡季相对湿度变化范围比单层民居大，而冬季则较为接近。

3.1.3 小结

- 1) 传统民居室内热湿环境随室外热湿环境波动明显，温度波动具有 1-2h 的延迟，相对湿度波动根据天气情况（晴天雨天不同），具有 2-6h 不等的延迟。
- 2) 夏季波动大于过渡季和冬季，温度波动略大于相对湿度波动。
- 3) 室内最高温度比最低温度随室外温度变化显著，室内最小相对湿度比最大相对湿度变化显著。

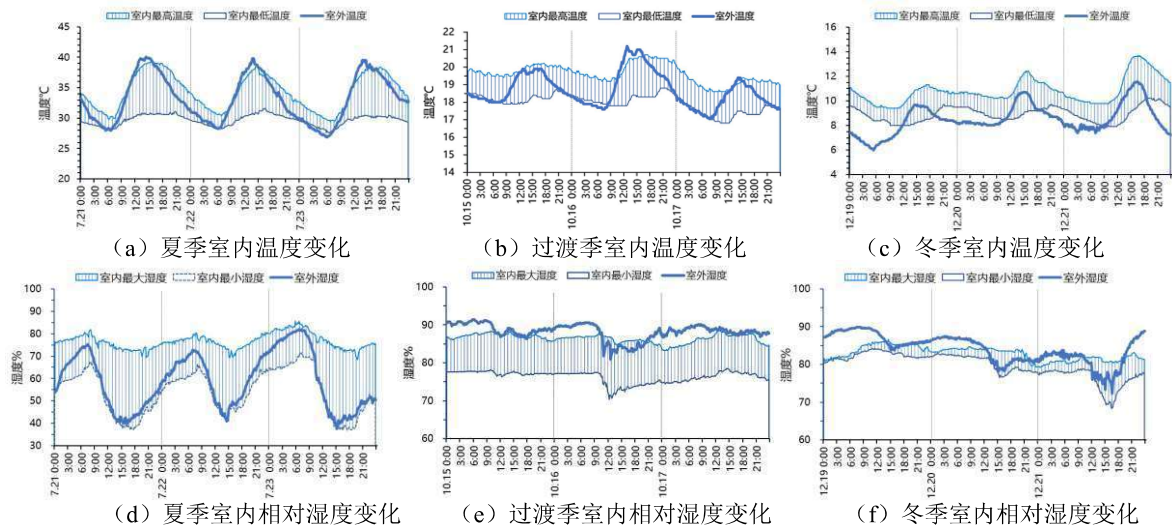


图2 各季节民居 C 室内温湿度变化

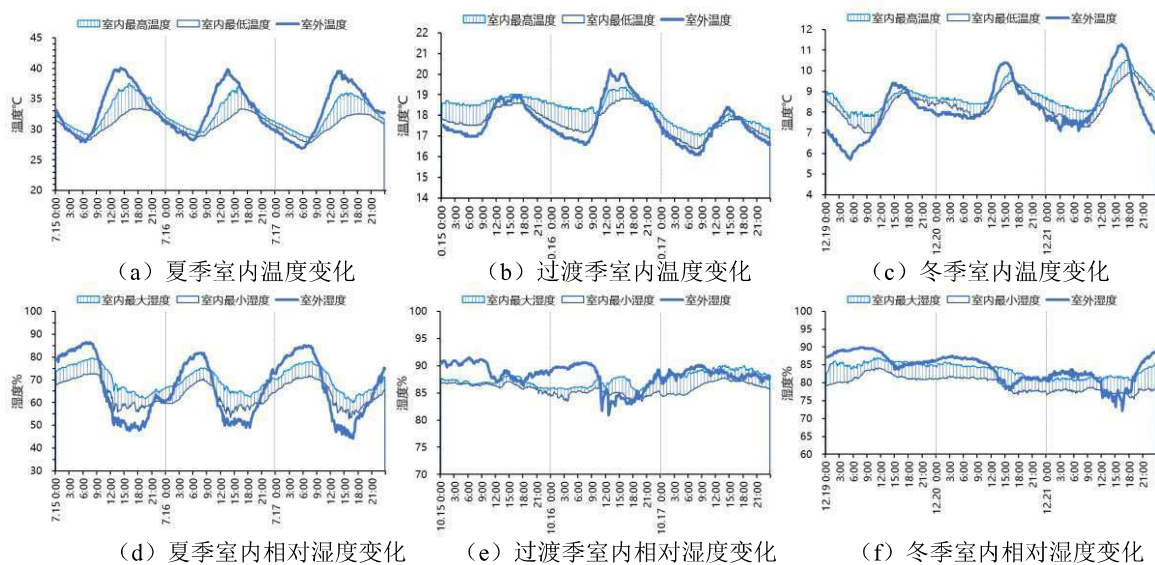


图3 各季节民居 D 室内温湿度变化

3.2 多样性和梯度性分析

3.2.1 温度分析

民居 C 中（图4），各房间温度分布均不完全相同，存在多样性和梯度性特征。各房间温度夏季差异大于过渡季和冬季，竖向（阁层、吊层、首层等不同楼层）差异大于水平（东西向房间进深）差异，首层全年波动范围最小，室内温度最稳定，阁层温度波动范围大于吊层，竖向空间温度波动存在多样性和梯度性。虽然存在多样性，但核心空间（测点 C3）的温度分布相对稳定，说明建筑内按主次关系，其温度变化存在梯度性，印证了核心空间热湿环境的重要性。

3.2.2 相对湿度分析

民居 C 各房间相对湿度也具有较为显著的差异（图4），竖向差异大于水平差异（规律同温度），首层相对湿度较为适宜，相对湿度分布范围存在梯度差异。核心空间比辅助空间相对湿度变化范围小，均值较为适中且稳定，说明不同空间相对湿度也存在较为明显的梯度差异。

3.2.3 小结

1) 传统民居室内不同空间温湿度具有显著的多样性特征。2) 空间按照主次关系，其热湿环境具有梯度性，即核心空间热湿环境相对稳定，而辅助空间更多作为气候缓冲层，其自身热湿环境变化和分布范围较大。3) 就总体差异度而言，温度差异略大于相对湿度差异，夏季差异大于过渡季和冬季差异，竖向维度不同空间差异大于水平维度不同空间差异。

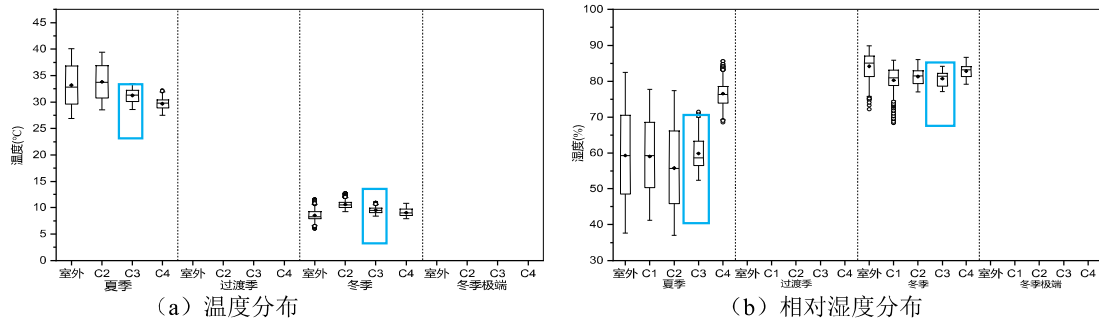


图4 民居 C 各季节不同空间室内温湿度分布

3.3 APMV 计算与不同等级达标率分析

3.3.1 APMV 计算

民居室内热湿环境是多因素综合的动态结果，单一因素数值的高低、优劣并不能客观反映室内热湿环境的整体情况，且使用者对室内热湿环境的感知也是综合的，因此，有必要以现行标准和实测值，对民居室内环境在不同等级的达标率进行计算，从而综合评价民居室内热湿环境状况。本文根据我国 2012 年最新的《民用建筑室内热湿环境评价标准》^[3]对实测的三倒拐各民居室内热湿环境的达标等级和达标率进行计算分析。传统民居属于自然通风的非人工冷热源热湿环境，评价划分为 I 级（90%人可接受）、II 级（75%人可接受）、III 级（少于 75%人可接受）三个等级（表2）。

表2 非人工冷热源热湿环境评价等级

等级	评价指标(APMV)
I 级	$-0.5 \leq APMV \leq 0.5$
II 级	$-1 \leq APMV < -0.5$ 或 $0.5 < APMV \leq 1$
III 级	$APMV < -1$ 或 $APMV > 1$

本文根据公式（1）对实测民居的不同空间，分不同季节和不同昼夜时段计算 APMV 值^{[3][5]}。

$$APMV = PMV / (1 + \lambda \cdot PMV) \quad (1)$$

式中： λ 为自适应系数，根据三倒拐地区属于夏热冬冷，取 0.21 ($PMV \geq 0$) 或 -0.49 ($PMV \leq 0$)。PMV 为预计平均热感觉指标，本文根据三倒拐实际调研情况，夏季服装热阻取 0.5clo，冬季取 1.5clo，新陈代谢率取 1.0met，温度、湿度、风速取连续典型时段实测值¹。

3.3.2 不同季节达标率分析

各民居、各空间均体现出过渡季明显优于夏季和冬季。过渡季室内热湿环境均处于 II 级以上，且 I 级占比明显高于夏、冬两季。冬季各民居不同空间基本处于 II 级，且达标率明显高于夏季，而夏季各民居不同空间均有较大占比处于 III 级，这与三倒拐地区夏季高温炎热，冬季温度相对温和适宜的气候条件相吻合。

3.3.3 不同昼夜时段达标率分析

各民居夜间的达标等级和达标率要略优于白天，且夏季夜间优于白天的占比要比过渡季和冬季大，冬季昼夜差别较小。其中，部分空间在夏季或冬季夜间室内热湿环境等级明显提升也在部分时段受使用者使用空调或采暖设备导致，比如民居 C 的首层起居室（兼卧室 C3）。

3.3.4 不同空间类型达标率分析

水平维度上，核心空间总体处于 II 级及以上的占比优于辅助空间，且其中处于 I 级的占比大于辅助空间。竖向维度上，首层热湿环境全年总体优于吊层和阁层。阁层在夏季的热湿环境较差，平均有 78%~84% 处于 III 级，而吊层在夏季的热湿环境较好，实测的两处典型吊层空间在夏季 II 级及以上占比可达 56%~88%，其中，I 级占比分别为 9% 和 37%（图5，图6）。综合各季节分析，由于吊层在夏季的达标率明显优于阁层，虽然在过渡季和冬季处于 I 级的占比要略低于阁层，但吊层在过渡季和冬季基本均处于 II 级或以上，而阁层在夏季有超过 70% 以上处于 III 级，吊层的整体达标率比阁层高，同时说明吊层的室内热湿环境更为稳定，并巧妙的利用了山体的全年热稳定性，而阁层随季节变化其达标等级及占比变化较大。

通过各建筑不同空间达标率的横向对比可以发现，整体建筑达标率最好的是具有吊层、阁楼、竖井等多个空间原型的民居 C，由此说明，不同空间原型具有环境差异性和梯度性，适宜的组合关系有利于建筑整体环境，特别是核心空间的提升。

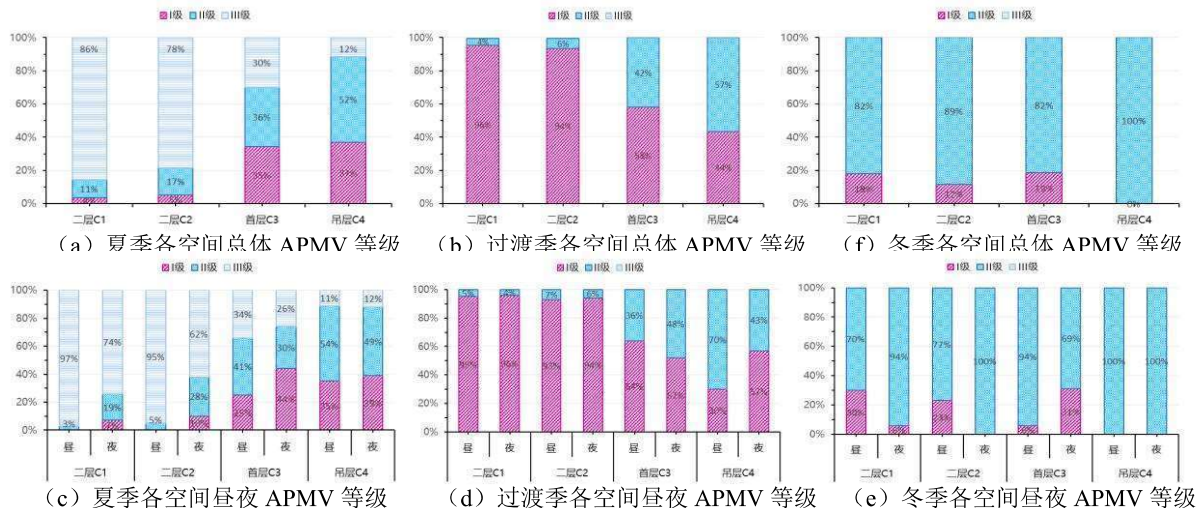


图5 民居 C 夏季、过渡季、冬季各空间总体及昼夜 APMV 等级分布

¹ APMV 计算说明：目前既有研究在计算 PMV 时常代入统一值，特别是风速，通常在重庆地区取值为 0.1-0.2m/s，而经本研究实测发现，在三倒拐地区，由于山地微气候和地方性风场，使得民居在通风时段内的平均风速往往会大于 0.2m/s 的情况，这对于室内热湿环境的改善有重要作用。因此，本文以实测风速、温度、湿度等数据进行计算，试图尽可能真实反映民居室内热湿环境的达标等级。

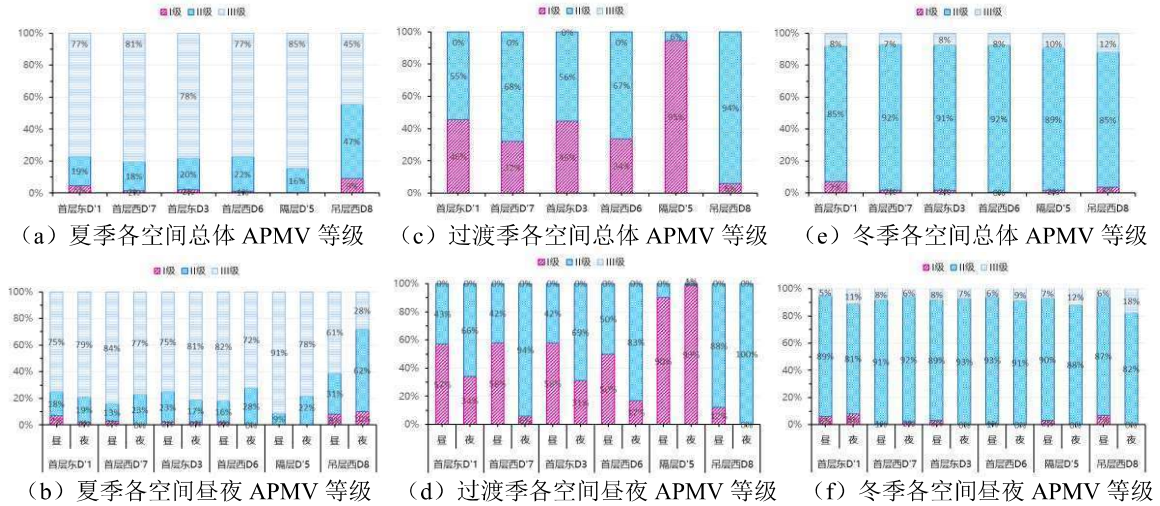


图6 民居 D 夏季、过渡季、冬季各空间总体及昼夜 APMV 等级分布

3.3.5 小结

1) 三倒拐场镇民居在过渡季的室内热湿环境整体达标等级良好，均处于 II 级以上，且 I 级达标率占比均在 30%以上，核心空间 I 级达标率在 45%~96%左右。

2) 夏季室内热湿环境达标率明显低于冬季，夏季除吊层空间外，其余各空间处于 III 级占比超过 60%，而冬季大部分空间均处于 II 级。

3) 不同空间室内热湿环境达标率存在梯度。在水平维度上，核心空间优于辅助空间；在竖向维度上，首层热湿环境整体优于吊层和阁层，吊层达标率整体优于阁层。夏季吊层热湿环境较好，过渡季和冬季阁层热湿环境较好。吊层比阁层具有更稳定的热湿环境。

4) 室内热湿环境达标率最好的是具有竖井、吊层、阁楼等空间原型的民居 C。

4 结论与讨论

以三倒拐场镇民居为典型代表的重庆场镇民居热湿环境特征总结如下：

1) 室内热湿环境具有显著波动性特征，与室外关联紧密。波动性与传统民居建筑空间的半开敞性和界面空间的透气性密切相关，说明传统民居对气候是引入而非屏蔽^[6]，尤其注重自然通风，营造“动态改善型”的室内舒适环境。

2) 室内热湿环境具有多样性和梯度性特征。多样性和梯度性体现出传统民居在空间组织、功能设置等方面具有分时分区、主次分明的特征，并利用吊层、阁层等空间营造和保持核心空间的热稳定性。

3) 不同时间、不同空间室内热湿环境舒适等级和达标率存在梯度差异。过渡季达标等级和达标率最好，其次是冬季，而夏季由于高温炎热，达标率较低。水平空间和竖向空间室内热湿环境均存在达标率存梯度差异，核心空间高于其它空间。吊层空间巧妙利用山体常年稳定的热工性能具有一定“冬暖夏凉”的特性，且夏季降温效果显著。不同空间组合有利于建筑室内整体热湿环境的提升。

民居营建策略建议：

- 1) 重核心空间，保持建筑环境的多样化和梯度化特征。
- 2) 重竖向空间组织，积极运用吊层、阁层等空间原型的环境调节作用。
- 3) 充分利用山体及其稳定的热工特性进行适地设计。
- 4) 适当加入主动式除湿技术与设备。

参考文献：

- [1] 刘加平 等. 绿色建筑——西部践行[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2015.
- [2] 刘加平，陈景衡. 城镇化进程中建筑学研究的新挑战[J]. 新建筑，2017(3).
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部.《民用建筑室内热湿环境评价标准》GB/T 50785-2012[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2012.
- [4] 杨真静，田瀚元. 巴渝地区夯土民居室内热环境[J]. 土木建筑与环境工程, 2015(06): 141 - 146.
- [5] 熊珂. 重庆场镇型传统民居室内热环境优化适宜技术研究——以安居古镇典型民居为例[D]. 重庆大学硕士论文, 2017.
- [6] 郝石盟. 民居气候适应性研究[博士学位论文][D]. 北京：清华大学, 2016.