专题：城市森林与城市热缓解

典型浅街峡谷中街道可视因子对行人夏季热舒适的影响*

高庆龙 沈师琪 欧阳金龙

四川大学建筑与环境学院 成都 610065

摘要：城市中广泛存在的浅街峡谷热环境比深街峡谷的较差，研究其空间可视要素对街谷热环境的影响可为城市规划设计提供参考。以成都市双流区东西向、南北向的两条浅街峡谷为例，在夏季典型日通过实测结合主观问卷调查的方式探索街道可视因子对行人夏季热舒适的影响，揭示街道可视因子与行人热舒适度之间的相关性，并建立成都市夏季浅街峡谷热舒适评价模型。结果表明：1）街道可视因子显著影响行人热舒适：天空可视因子每提高 10%，热感觉评分升高 18%，热舒适度降低；树木可视因子每提高 10%，热感觉评分下降 19%，热舒适度提升；建筑可视因子则无显著相关性。2）午后 14：00—16：00，天空可视因子与街谷行人热舒适度之间的相关性显著强于其他时间段，归因于人们的心理感知与适应机制。3）由于太阳辐射分布的差异，南北向街谷热环境优于东西向街谷，行人热舒适水平更高。4）热舒适评价模型表明，夏季提高风速与减少太阳辐射是改善街谷行人热舒适更为适宜的途径。因此，种植冠大荫浓的行道树、增加街谷两侧垂直绿化与创造街谷内积极体验性空间是改善街谷行人热舒适更为有效的方式。

关键词：浅街峡谷；街道可视因子；行人热舒适；热舒适评价模型；成都市

DOI：10.12169/zgcsly.2024.09.27.0001

Influences of Street View Factors on Pedestrian Summer Thermal Comfort in Typical Shallow Street Canyon

Gao Qinglong Shen Shiqi Ouyang Jinlong

(College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Shallow street canyons, which are widely found in cities, have worse thermal environment than deep street canyons, and the study of the influences of their spatial-visual elements on the thermal environments of street canyons can provide a reference for urban planning and design. Taking two shallow street canyons in east-west and north-south directions in Shuangliu District of Chengdu City as an example, we explore the influence of street view factors on pedestrian thermal comfort in summer by means of the combination of actual measurements and subjective questionnaire surveys on typical summer days, reveal the correlation between street view factors and pedestrian thermal comfort, and established a thermal comfort evaluation model for the shallow street canyons in summer in Chengdu City. The results show that: 1) Street view factors significantly affect pedestrian thermal comfort. For every 10% increase in sky view factors, thermal sensation scores increase by 18% and thermal comfort decreases; for every 10% increase in tree view factors, thermal sensation scores decrease by 19% and thermal comfort improves. There is no significant correlation between building view factors; 2) The correlation between sky view factors and

收稿日期：2024-09-27

* 基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFC3802704）

第一作者：高庆龙（1978-），男，博士，教授，研究方向为建筑环境与节能。E-mail：gao3066@163.com

通信作者：欧阳金龙（1976-），男，博士，教授，研究方向为城市与建筑物理环境。E-mail：ow761202@scu.edu.cn

pedestrian thermal comfort is significantly stronger at 14∶00-16∶00 in the afternoon than in the other time periods, which is attributed to people's psychological perception and adaptation mechanism; 3) Due to the difference in the distribution of solar radiation, the thermal environment of the street canyon in north-south direction is better than that in east-west direction, which results in a higher level of pedestrian thermal comfort; and 4) Thermal comfort evaluation modeling indicates that increasing wind speed and the reducing solar radiation are the appropriate ways to improve the thermal comfort of pedestrians in the street canyon in summer. In this sense, it is concluded that the more effective ways to improve the pedestrian thermal comfort in the street canyon are planting street trees with large canopy, increasing vertical greening on both sides and creating positive experiential spaces.

Keywords: shallow street canyon; street view factor; pedestrian thermal comfort; thermal comfort evaluation model; Chengdu City

城市街道是城市环境中的重要组成部分，是人们通勤活动的主要场所[1]。随着城市化进程的加快，热岛效应在城市环境中逐渐显著[2]。成都市地处亚热带季风气候区，总体规划为“一心两轴、一带一环、多中心”的空间格局，热岛效应呈现出以中心城区为热中心，向城区周围扩散的分布特征[3]。研究显示，同一朝向条件下城市中的浅街谷相较于深街谷热环境较差[4]。因此在城市规划日益关注健康与环保的趋势下，针对浅街谷空间要素的研究具有一定的理论意义和实践参考价值。

街谷热环境已被证明受到街谷走向、高宽比与街道可视因子等因素的影响[5]。天空可视因子被定义为可视天空的百分比，通过影响太阳辐射的进入进而影响街谷小气候环境[6]。由于街谷内热环境同时受到建筑与树木等因素影响，因此将天空可视因子、建筑可视因子、树木可视因子统称为街道可视因子，有助于更全面地描述城市环境结构特征[7-8]。近年来，改善街谷空间小气候的研究成为城市空间微气候领域的学术焦点[9-10]。有学者提出改善建筑空间要素与植物空间要素对街谷热环境有显著的优化作用[11-13]。众多学者在不同地区的研究中提出街道可视因子与街谷热环境和热舒适度有显著相关关系，包括杭州市[14]、广州市[15]、咸阳市[16]以及哈尔滨市街谷[17]，但是对于西南地区尤其是成都市的研究尚显不足，且现有研究大多聚焦于客观热环境与街道可视因子的关联性，针对不同街道可视因子与行人热舒适的主观感受评价的研究相对匮乏。

随着成都市公园城市的发展建设，街谷规划设计更加注重微气候环境的改善。因此，以成都市的典型浅街峡谷，即街谷高宽比不超过 0.5 的街道峡谷为例，采用实测研究与主观问卷调查相结合的方式探索两条不同朝向的浅街峡谷中各街道可视因子下的行人热舒适度，建立成都市夏季浅街谷热舒适评价模型，为城市规划设计提供理论依据和实践指导。

1 研究对象

研究表明，成都市热岛效应呈现出南部比北部区域更加严重的现象[18]，因此考虑到研究区域的典型性与不同街谷走向太阳辐射的差异，选取双流区两条不同朝向的浅街峡谷（H/W ≤ 0.5）作为研究对象（表 1）。两条街谷以居住区为主，人们的日常出行活动较为频繁；行道树以香樟（*Cinnamomum camphora*）为主。

表 1 研究样地的几何参数

研究样地	朝向	H/W	H/m	W/m	L/m
街道 1	E-W	0.35	16.5	47	200
街道 2	N-S	0.48	18.0	37	200

注：H/W 为街谷高宽比；H 为街道两侧建筑的平均高度；W 为街道宽度；L 为街道长度。

如图 1 所示，从东西朝向的街道 1 选择 3 个测点 A、B、C，从南北朝向的街道 2 选择 4 个测点 D、E、F、G 进行实测。测点选择依据为：1）街道两侧建筑具有较好的连续性且形态规整；2）街道朝向为正南北、正东西方向；3）街谷内测点周边无明显的人工热源及较少人工干扰。各测点的天空可视因子（SVF）、建筑可视因子（BVF）、树木可视因子（TVF）[19]如表 2 所示。

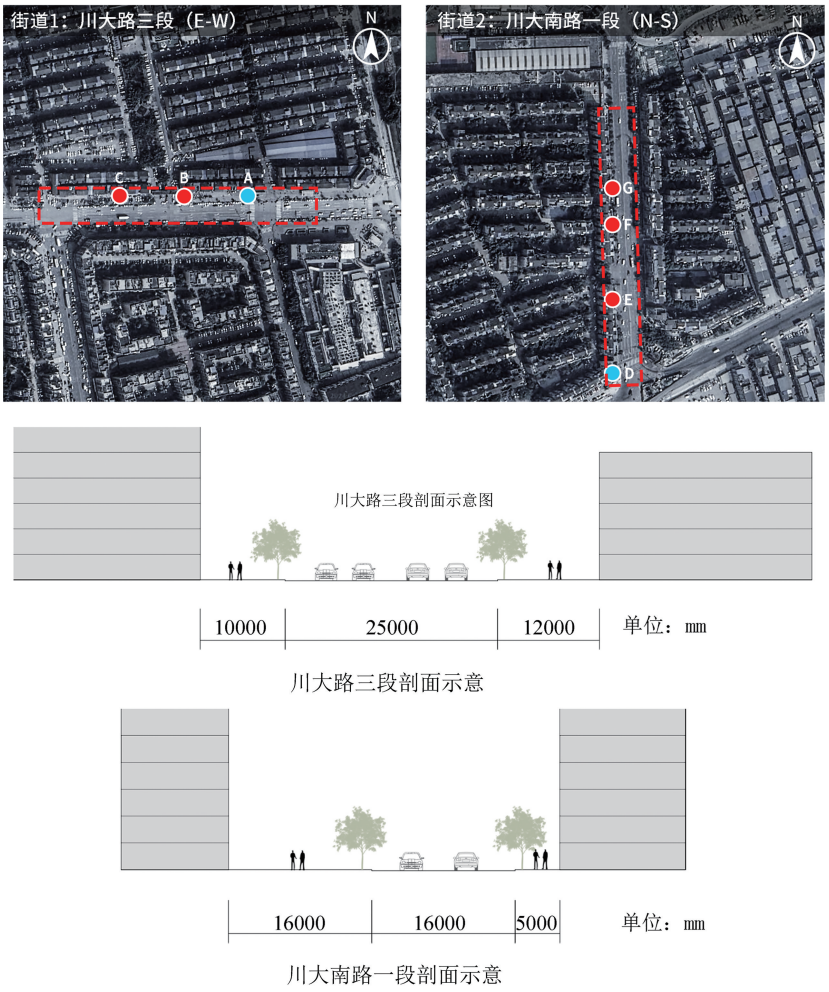


图 1　测点位置及街谷剖面示意图

表 2　各测点天空可视因子、建筑可视因子与树木可视因子

街道可视因子	测点 A	测点 B	测点 C	测点 D	测点 E	测点 F	测点 G
SVF	0.788	0.524	0.384	0.650	0.268	0.215	0.498
BVF	0.163	0.239	0.229	0.229	0.362	0.162	0.257
TVF	0.049	0.237	0.387	0.121	0.370	0.623	0.245

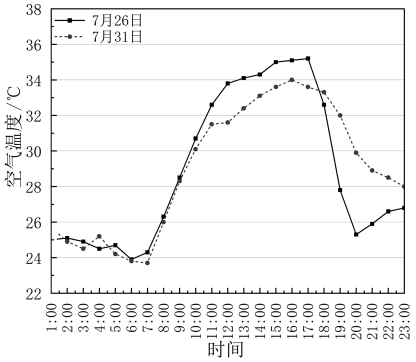
2　研究方法

2.1　热环境实测

在夏季选择 2 个晴朗少云、天气状况相似的典型日（2024 年 7 月 26 日与 31 日）进行测量（图 2、表 3），结果可比性较强。测量时间为人群活动最频繁的 10：00—16：00，此时为夏季最热时段，能够直观反映行人在极端热条件下的热舒适度和生理反应。实测中使用鱼眼镜头拍摄，并采用 RaymanPro 软件计算得出街道可视因子。微气候测试仪器为 JT2180 热舒适度测试仪，具体参数如表 4 所示，测试仪器均架设在 1.5 m 高的三脚架上，采样时间设定为 1 min 采集一次数据，包括空气温度（T_a，℃）、黑球温度（T_g，℃）、相对湿度（RH，%）、风速（v_a，m·s^{-1}），并基于此基础数据根据公式（1）计算得出平均辐射温度（Mean Radiant Temperature，T_{MRT}）[20]。

$$T_{MRT}=\left[(T_g+273)^4+\frac{1.1\times10^8\times v_a^{0.6}}{\varepsilon_g\times D^{0.4}}(T_g-T_a)\right]^{1/4}-273 \tag{1}$$

式（1）中：ε_g是黑球表面发射率，为 0.95；D 为测试黑球直径，为 50 mm。



注：数据来源于中央气象台。

图 2 实测日空气温度时刻图

表 3 实测日基本气象数据

日期	天气状况	空气温度/℃	相对湿度/%	平均风速/(m·s^{-1})
2024 年 7 月 26 日	晴	24~35	58~89	1.67
2024 年 7 月 31 日	晴	24~34	54~91	1.68

表 4 仪器测量参数

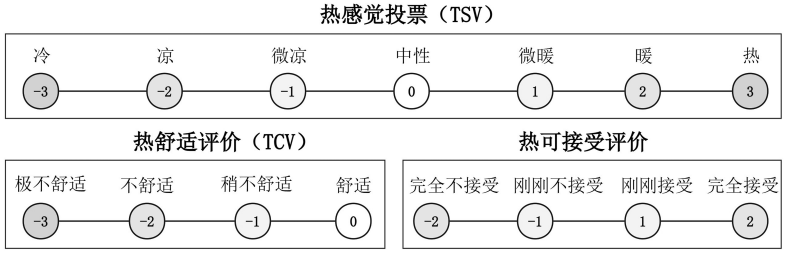
仪器名称	JT2180 热舒适度测试仪	
测量内容	测试范围	精确度
空气温度/℃	−20~85	±0.5
黑球温度/℃	−20~85	±0.5
湿球温度/℃	5~60	±0.5
相对湿度/%	10~90	±3
风速/(m·s^{-1})	0.05~2.0	±(0.05 m·s^{-1}+2%读数)
	2.0~5.0	±(0.1 m·s^{-1}+2%读数)

2.2 热舒适问卷调查

主观问卷调查与微气候数据实测同时进行，为了保证调研数据科学客观，选择测点附近的受测对象，并保持年龄与性别相对均衡。热舒适调查问卷主要包括两部分[21]：1）受测对象的基本信息。2）受测对象的热感觉投票、热舒适评价及热可接受评价（表 5、图 3）。

表 5 问卷内容

问题编号	问题内容
1	基本信息——您的性别、年龄、穿着、在成都生活时长？
2	热感觉投票——您认为现在所处地点的热感觉是怎样的？
3	热舒适评价——您认为现在所处地点的热舒适程度是怎样的？
4	热可接受评价——您认为现在所处地点的热环境下您的接受程度是怎样的？



注：根据受测者自身对于所处环境的感觉进行评分，“冷”与“热”是导致受测者感到极度不适的选择；“凉”与“暖”为感到不适但能接受的选择；“微凉”与“微暖”为感到舒适但还希望更舒适的选择；“中性”即为感到最舒适的选择。

图 3 热舒适问卷量表

2.3 热舒适评价指标

本文选用生理等效温度（PET）作为人体热舒适度的评价指标。为了更直观地观察不同 PET 值对行人热感觉的影响趋势，将所有 PET 数据按照每 1℃ 的区间分组，并在每个区间内计算平均热感觉投票（MTSV）。

3 结果与分析

3.1 街谷微气候

3.1.1 空气温度

如图 4A 所示，受到 SVF 与街道朝向的影响，不同街道测点的空气温度有所差异，总体来说呈现出波动上升的趋势。东西朝向的街谷内测点的平均空气温度关系为测点 A>B>C。南北朝向的街谷空气温度呈现波动变化的现象，其中 D、E 测点 11∶00 前显著上升，11∶00—12∶00 平缓下降，正午之前街谷西侧测点 D、E 位置接受的太阳辐射大于东侧，因此空气温度呈现显著上升的趋势；测点 G、F 在 14∶00 前空气温度稳定，14∶00 之后开始升温。对比两条不同朝向的街谷可知，东西朝向的街谷（测点 A、B、C）在午后时段内总体空气温度高于南北朝向的街谷（测点 D、E、F、G）、热环境较差，而同一街谷中平均空气温度与 SVF 成正比、与 TVF 成反比。

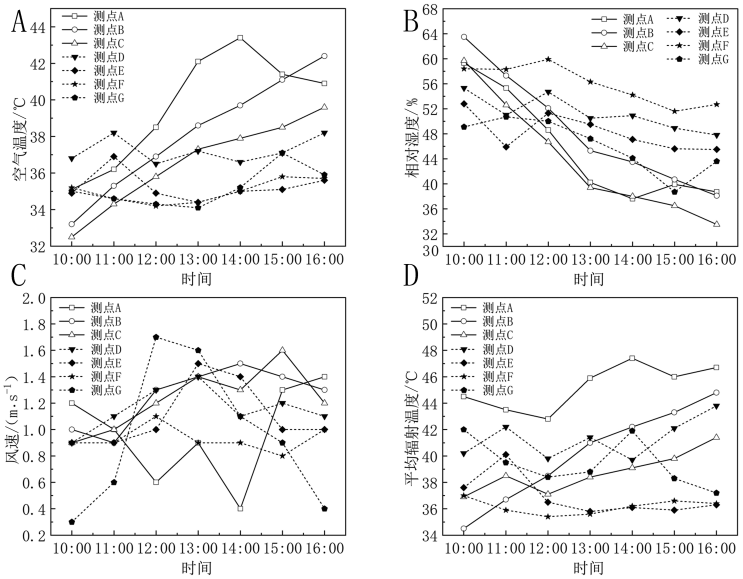


图 4　街谷微气候数据

3.1.2　相对湿度与风速

由图 4B 可知，各街谷的相对湿度总体呈波动下降的趋势，南北向街谷的（测点 D、E、F、G）相对湿度在午后时段总体大于东西向街谷（测点 A、B、C）。东西向街谷各测点之间的湿度差异呈明显的梯度变化，湿度差异的大小关系为测点 C>B>A，其中，街谷内 SVF 值最小的测点 C 相对湿度变化幅度最大；南北向街谷内 SVF 值最小、TVF 值最大的测点 F 相对湿度维持在较高水平，平均值为 55.9%。

由图 4C 可知，总体风速浮动范围处于 0.3~1.7 m·s^{-1}，其中东西向街谷的平均风速为 1.15 m·s^{-1}，而南北向为 1.03 m·s^{-1}，总体来说东西向大于南北向街谷。街谷风速测量时保证了测点周边无行人及车辆等人为的干扰，降低了所获数据的误差。

3.1.3　平均辐射温度

如图 4D 所示，平均辐射温度总体呈现平缓上升的趋势，差值达 12.9 ℃。东西向街谷的平均辐射温度约为 41.4 ℃，南北向约为 38.5 ℃，低于东西向。对比两条街道各测点的平均辐射温度，结果为测点 A>D>B>G>C>E>F，其中测点 A 平均辐射温度最高，而测点 F 最低且变化趋势相对平缓，整体呈现出与 SVF 及 TVF 较为显著的相关关系。

3.2　热舒适主观评价

共获得有效调查问卷 237 份，其中每个测点问卷数量在 30 份以上。受测者年龄与性别分布相对平均，男性约占 47.3%，女性约占 52.7%；年龄为 0~40 岁的人群占 56%，40~80 岁的人占 44%。

热感觉投票结果由图 5 所示，所测行人总体热感觉投票中“热”（TSV=3）占比最高，中性（TSV=0）占比最低。南北向街谷总体热感觉投票低于东西朝向街谷。SVF 较大的测点 A 与 D，热感觉投票偏热，而 SVF 较低的测点 E 与 F 热感觉投票偏中性，说明 SVF 对于行人热舒适感觉有显著影响。

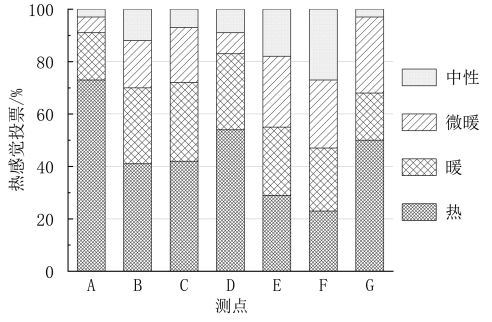


图 5　热感觉投票

热舒适投票结果如图 6A 所示，绝大部分受测者感到“不舒适”，“舒适”占比最低，其中南北向街谷（测点 D、E、F、G）“不舒适”的占比与东西向（测点 A、B、C）相近。由图 6B 可知，绝大部分受测者“刚刚接受”街谷内热环境，极少部分受测者能“完全接受”，说明行人对于实测日的街谷热环境接受度较低。

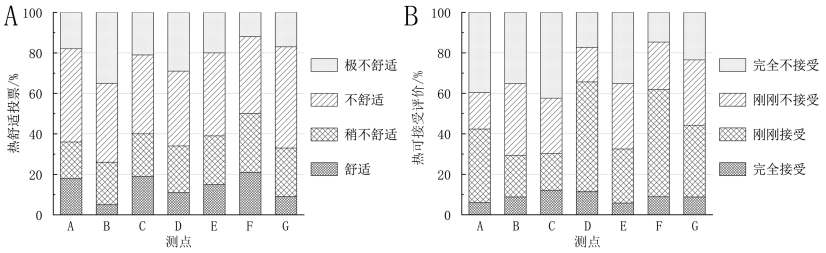


图 6 热舒适投票与热可接受评价

3.3 相关性分析

3.3.1 街道可视因子对平均辐射温度的影响

由图 7A 可知，SVF 与所有测点的平均辐射温度均呈极显著（$P<0.001$）正相关关系。而针对不同时段的相关性分析（图 7B）可知，午后 14：00—16：00 时间段内，SVF 与各测点平均辐射温度的相关性更高。由图 7C 可看出，TVF 与各测点平均辐射温度呈现极显著（$P<0.01$）负相关关系；图 7D 则表明，BVF 与各测点平均辐射温度的相关性较低（$P>0.5$）。

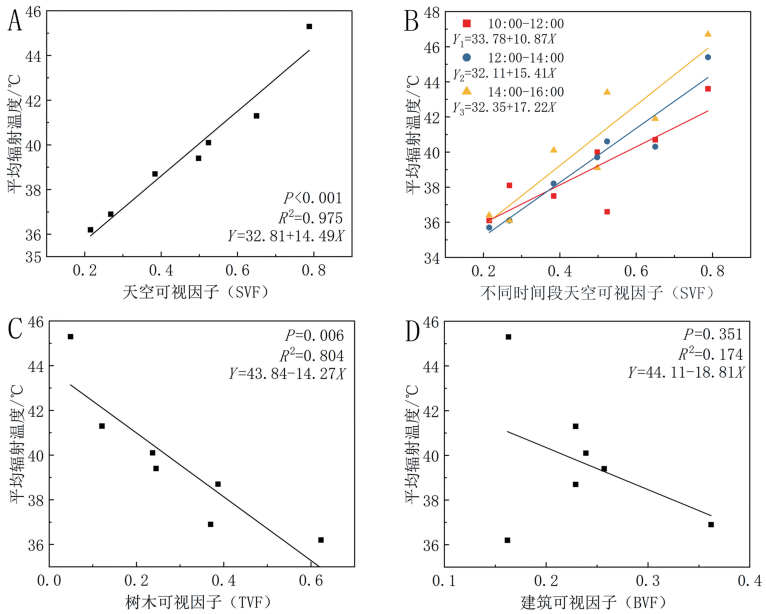


图 7 各可视因子与平均辐射温度的相关性分析

3.3.2 街道可视因子对热舒适的影响

如图 8A 所示，平均热感觉投票与 SVF 存在极显著（$P<0.001$）正相关关系。图 8B 所示的不同时间段 SVF 与热感觉投票之间的关系在 12：00—14：00 时间段内呈现出更为突出的相关性，说明午后行人的热感觉受到 SVF 的影响更大，主要是因为正午时刻太阳高度角接近最大值，太阳辐射垂直入射地表，SVF 直接影响了地表接受太阳辐射。图 8C 表明，TVF 与热感觉投票呈极显著（$P<0.01$）的负相关关系。图 8D 所示的 BVF 与热感觉投票无明显相关关系（$P>0.5$），说明建筑的遮阴作用对于人体热感觉无明显影响。

3.3.3 中性 PET

如图 9 所示，通过回归拟合分析的方法将各组的 PET 数值与对应的 MTSV 建立联系，得出的回归方程能够清晰地描述行人主观热感受随 PET 变化的趋势，当 MTSV 的值接近 0 时，对应的 PET 值可以被视为该区域内行人的热中性温度，即人体在此温度下感觉既不冷也不热的舒适状态。将 MTSV = 0 代入回归方程，得到中性 PET 值为 26.5 ℃，即为大多数行人会感受到舒适的温度。计算结果与成都市城市公园热舒适热中性 PET 研究结果的 27.01 ℃ 相近[22]。

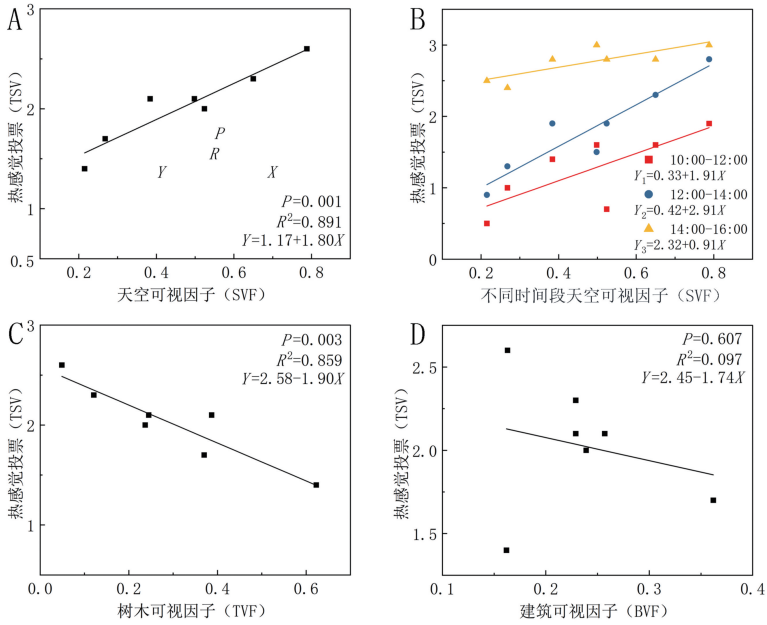


图 8　各测点可视因子与热感觉投票之间的关系

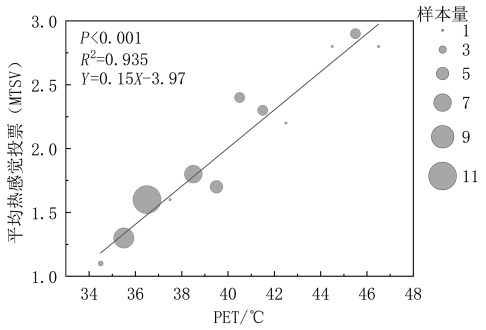


图 9　各测点平均热感觉投票与 PET 的相关性分析

3.3.4　热感觉预测公式

通过建立行人主观热感受与不同街道可视因子空间下热环境参数的多元线性回归模型，得到该研究区域夏季的热感觉预测公式。

$$TSV = 0.312 - 0.187T_a - 0.017RH + 0.745v_a + 0.220T_g (R^2 = 0.991) \quad (2)$$

式（2）中：TSV 是热感觉投票；T_a 是空气温度（℃）；RH 是相对湿度（%）；v_a 是风速（m·s^{-1}）；T_g 是黑球温度（℃）。

由式（2）可知，空气温度与相对湿度都与 TSV 呈负相关关系，风速与黑球温度与之呈正相关关系。根据式（2）中系数，4 个自变量对于热感觉投票的影响权重大小从大到小依次为：风速>黑球温度>空气温度>相对湿度。以上说明在成都市夏季浅街谷内部风速与黑球温度对人体热舒适的影响较大，空气温度与相对湿度影响较小。

4　讨论

4.1　街道可视因子与热环境

研究表明，空气温度与 SVF 呈正相关关系而与 TVF 呈负相关关系，这一结果与意大利及哈尔滨市研究的结论相吻合[23-24]。主要是由于街谷表面吸收太阳辐射从而增加了日间地表辐射温度[25]，而城市绿地通过植被冠层对太阳辐射的阻挡与叶片的蒸腾作用能有效降低植被冠层表面和林下的大气温度，产生明显的降温效应[26]。在城市规划中应注意对于各街道可视因子的控制，包括合理的建筑物布置与绿化覆盖率的提升等。本研究所得相对湿度与 SVF 呈负相关关系、湿度波动程度与 SVF 的关系的结果与杭州市街谷热环境研究[14]呈现不同的趋势，推断此现象归因于不同类型植被蒸腾作用的差异。

本研究 SVF 与平均辐射温度呈极显著的正相关关系，这与澳大利亚某沿海城市[27]和哈尔滨市[24]的研究结果相对一致[24, 27]。“TVF 比 BVF 与平均辐射温度有更显著的相关性”，说明树木的遮荫在街谷热环境的改善方面起到了重要作用，哈尔滨历史街区的研究表明树荫对街道峡谷的热环境有显著影响，平均遮荫效果为 56.3%[28]，这与本文研究结论相一致。植被可以通过遮蔽长短波辐射和蒸腾等作用起到降低气温、增加湿度的

效果[29]，植被向外发射长波冷辐射与建筑物的高热储存能力是导致二者与平均辐射温度存在相关性差异的主要原因。建筑与植被冠层两种遮荫下光合有效辐射分别为天空自然辐射的 9.09% 和 5.50%[30]，也说明了二者在辐射接收方面的差异。街谷内植物不仅能够通过蒸腾作用与遮荫效果使得周围环境温度降低，从而改善热环境[31]，还在减少噪声传播的同时降低空气污染浓度，提升街谷的整体环境。

4.2 街道可视因子与行人热舒适度

本研究表明，SVF 与行人热感觉投票之间存在极显著的正相关关系，即随着街道可视范围的扩大，行人的热感觉显著提升，热舒适度降低。

TVF 与行人热感觉投票之间存在极显著的负相关关系，主要是由于树木的蒸腾作用增加了空气湿度，有效降低周围空气的温度，而树冠的遮荫作用通过阻挡太阳辐射减少了地面空间接收的热量，改善了行人的热舒适，这与上海研究结果一致[32]。BVF 与行人热舒适感之间则未表现出明显的相关性，这是因为建筑物的热储存特性，建筑热流波动引起的室内外热质传递过程[33]，即白天吸收热量并在夜间释放，导致周围的微气候环境变差，从而削弱了对行人热舒适感知的积极影响。

4.3 街道朝向与热环境

对比不同朝向街谷来看，东西向街谷比南北向的总体热环境较差，这与天津原租界街区夏季室外热舒适的研究观点相对一致[34]。以色列地中海沿岸地区的研究同样表明，在一天最热的时段（15 ： 00），N－S 街道的气温比 E－W 街道低 0.64 K[35]。原因可能是由于东西向街道在一天中接受太阳直射的时间更长[36]，街道两侧的建筑物和地面吸收了大量的太阳辐射，尤其是东西向街道西侧的表面会吸收更多的太阳能量，从而积聚了更多的热量，释放到周围的空气中导致整体温度的上升。这种辐射和热量积聚的共同作用，使得东西向街道的平均辐射温度显著高于南北向，相对湿度较低。

4.4 街谷规划设计优化建议

1）扩大树冠遮蔽面积，提高街谷树木可视因子。在浅街谷绿化设计时，应注重街谷内部绿化的合理布局，选择冠大荫浓的乔木作为行道树，提升街谷内的树木可视因子，降低街谷接受的太阳辐射，利用植物降温增湿功能改善街谷微气候环境，提升行人的热舒适度。树种选择时应因地制宜选择当地乡土树种，并确保四季皆有遮蔽效果。此外，合理的树木位置与数量布局有助于形成通风廊道，实现街谷内部空气流通与热量调节。

2）街谷两侧布置垂直绿化，减轻建筑表面热负荷。在街谷两侧建筑表面增加活墙绿化或攀缘植物，降低因建筑物材料导致的街谷内部热积聚，并结合建筑遮阳措施优化天空可视因子，从而改善街谷行人热舒适度。

3）加强街谷空间积极体验性设计，改善行人心理热舒适感受。通过层次丰富的绿化景观设计提升街谷内部的空间自然性，并融入文化要素改善人们的心理感知体验，从心理层面改善人们的热舒适感受。

5 结论

本研究深入探讨了成都市街道可视因子对夏季浅街峡谷行人热舒适度的影响，并提出了相应的优化策略。研究发现，街道可视因子是影响成都市夏季浅街峡谷行人热舒适度的重要因素，尤其是树木可视因子对行人热舒适度的影响显著高于建筑可视因子。在不同时间段内，午后时段的天空可视因子与行人热舒适度的相关性尤为突出。研究还发现，东西朝向的浅街峡谷在行人热舒适度方面明显较差，相比之下，南北朝向的街谷表现较好，显示出街谷朝向对热舒适度的显著影响。因此建议在成都市夏季浅街峡谷的设计中，重点提升树木可视因子，并结合垂直绿化与积极性体验空间设计，以显著改善浅街峡谷内行人的热舒适感受。

本研究主要集中在成都市，限制了结果的普遍性；由于地域差异性，其他城市的适用性尚需进一步验证；研究选择了特定的夏季测量日期，可能忽视了不同气候条件下的行为变化。后续研究中应进一步考虑到地域与时间的差异以完善整体研究。

参考文献

[1]刘滨谊,彭旭路.城市街道小气候舒适性研究进展与启示[J].

中国园林,2019,35(10):57-62.
[2]OLESON K W,MONAGHAN A,WILHELMI O,et al.Interactions between urbanization,heat stress,and climate change[J].Climatic Change,2015,129(3):525-541.
[3]黄旭龙,曾胜兰,庞斯竞,等.成都市热岛效应特征分析[J].地球科学前沿,2024,14(8):1099-1109.
[4]杜晓寒,陈东,吴杰,等.街谷几何形态及绿化对夏季热环境的影响[J].建筑科学,2012,28(12):94-99.
[5]STEEMERS K.Energy and thecity:density,buildings and transport[J].Energy and Buildings,2003,35(1):3-14.
[6]MONTEITH J L,OKE T R.Boundary layer climates[J].The Journal of Applied Ecology,1980,17(2):517.
[7]MILLS G.The radiative effects of building groups on single structures[J].Energy and Buildings,1997,25(1):51-61.
[8]董玉宽,张哲,孙诗溢,等.基于微气候模拟的城市综合公园活动空间热舒适评价研究[J].西部人居环境学刊,2023,38(6):15-21.
[9]冯晓刚,杨永佺,李萌,等.居住区绿地改造夏季热环境模拟与优化策略研究[J].西部人居环境学刊,2023,38(5):59-64.
[10]吴昌广,樊萱,肖乾坤,等.街谷行道树种植对环境热舒适度的影响及适应性设计研究进展[J].西部人居环境学刊,2023,38(6):60-66.
[11]樊亚妮,董芦笛.西安城市街道“单拱”型林荫街谷空间冬季微气候测试分析[J].中国园林,2022,38(2):115-120.
[12]刘慧娇,张中一,冯国庆,等.聊城市东昌湖湿地公园植物空间秋季热舒适[J].中国城市林业,2024,22(1):177-183.
[13]陈俊,何荣晓,曹凌仪,等.街道环境因素对夏季人行空间热舒适的影响[J].中国城市林业,2023,21(1):37-42,49.
[14]郭晓晖,包志毅,吴凡,等.街道可视因子对夏季午后城市街道峡谷微气候和热舒适度的影响研究[J].中国园林,2021,37(9):71-76.
[15]杜晓寒,石玉蓉,张宇峰.广州典型生活性街谷的热环境实测研究[J].建筑科学,2015,31(12):8-13,87.
[16]许敏,洪波,姜润声.校园行道树对夏季室外行人热舒适的影响研究[J].中国园林,2020,36(3):139-144.
[17]赵晓龙,李国杰,高天宇.哈尔滨典型行道树夏季热舒适效应及形态特征调节机理[J].风景园林,2016,23(12):74-80.
[18]颜萍.基于遥感数据的成都市土地利用类别与热岛效应关联性研究[D].成都:西南交通大学,2022.
[19]YANG F,LAU S S Y,QIAN F.Urban design to lower summertime outdoor temperatures:an empirical study on high-rise housing in Shanghai[J].Building and Environment,2011,46(3):769-785.
[20]中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑热环境测试方法标准:JGJ/T 347—2014[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.
[21]YI C Y,CHILDS C,PENG C Z,et al.Thermal comfort modelling of older people living in care homes:an evaluation of heat balance,adaptive comfort,and thermographic methods[J].Building and Environment,2022,207:108550.
[22]毛雨杨,韩坤.城市公园室外热舒适状况探究:以成都市两个城市公园为例[J].城市建筑,2023,20(10):87-91.
[23]SCARANO M,SOBRINO J A.On the relationship between the sky view factor and the land surface temperature derived by Landsat-8 images in Bari,Italy[J].International Journal of Remote Sensing,2015,36(19/20):4820-4835.
[24]LI G H,REN Z H,ZHAN C H.Sky view factor-based correlation of landscape morphology and the thermal environment of street canyons:a case study of Harbin,China[J].Building and Environment,2020,169:106587.
[25]周伟奇,田韫钰.城市三维空间形态的热环境效应研究进展[J].生态学报,2020,40(2):416-427.
[26]YANG Q J,SU W Y,LIN Z Q.A microclimate model for plant transpiration effects[J].Urban Climate,2022,45:101240.
[27]ZHANG J,GOU Z H,LU Y,et al.The impact of sky view factor on thermal environments in urban parks in a subtropical coastal city of Australia[J].Urban Forestry & Urban Greening,2019,44:126422.
[28]LI G H,HE N,ZHAN C H.Evaluation of tree shade effectiveness and its renewal strategy in typical historic districts:a case study in Harbin,China[J].Environment and Planning B:Urban Analytics and City Science,2022,49(3):898-914.
[29]崔凤娇,邵锋,齐锋,等.植被对城市热岛效应影响的研究进展[J].浙江农林大学学报,2020,37(1):171-181.
[30]于盈盈,胡聃,王晓琳,等.城市不同遮阴环境下光强和光质特征[J].生态学报,2015,35(23):7748-7755.
[31]王晓娟,孔繁花,尹海伟,等.高温天气植被蒸腾与遮荫降温效应的变化特征[J].生态学报,2018,38(12):4234-4244.
[32]LIU Y,YU Z Y,SONG Y F,et al.Psychological influence of sky view factor and green view index on daytime thermal comfort of pedestrians in Shanghai[J].Urban Climate,2024,56:102014.
[33]刘衍,毕冰藤,乔宇豪,等.建筑蓄热原理及其设计参数[J].科学通报,2024,69(11):1475-1490.
[34]保娟娟,黄琼,张安晓,等.天津原租界街区夏季室外热舒适研究[J].南方建筑,2021(5):108-118.
[35]SHASHUA-BAR L,HOFFMAN M E.Quantitative evaluation of passive cooling of the UCL microclimate in hot regions in summer,case study:urban streets and courtyards with trees[J].Building and Environment,2004,39(9):1087-1099.
[36]JAMEI E,RAJAGOPALAN P,SEYEDMAHMOUDIAN M,et al.Review on the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2016,54:1002-1017.