上海创智天地广场热舒适分析与评价

The Analysis and Evaluation of Thermal Comfort at Shanghai Knowledge & Innovation Community Square

**摘 要**：主要通过上海创智天地广场夏秋冬三季小气候实测与问卷调查，探讨广场空间形态、热环境和使用者心理感知之间的关系，10个测试日共获得问卷870份。结果表明：1)SVF与广场热环境关系紧密，夏季需要更小的SVF，冬季需要更大的SVF；2)热中性与热舒适范围随季节发生变化，热感觉、热舒适与空气温度、PET显著相关，就相关系数而言，热感觉更高；3)人们的热感觉和热认知较为一致的是广场夏季热环境更为严峻；4)空间开阔是人们在秋冬两季来广场的主要原因，它影响了人们对广场各区的热认知；5)创智广场的热中性范围低于国歌广场，空间形态与行为活动的耦合可能影响了人们的热中性范围。本研究成果可为上海高密度环境广场热环境设计及优化提供依据。

**关 键 词：**风景园林；城市广场；小气候；热感知；空间形态

**文章编号：**1000-6664(2018)02-0000-07

**中图分类号：**TU 986

**文献标志码**：A

**收稿日期**：2017-12-15

**修回日期：**2017-12-25

**Abstract:** This paper mainly discusses the relationship among space

form, thermal environment and users' psychological perception via micro-climatic test and questionnaire in three seasons (summer, autumn and winter) at Shanghai Knowledge & Innovation Community (KIC) Square, with 870 questionnaires completed during 10 test days. The analytical results have indicated the following findings. 1) The thermal environment of the square closely relates to sky view factors (SVF), and summer requires smaller SVF while winter requires larger SVF. 2) The range of thermal neutrality and thermal comfort vary with seasons, both of them are significantly related to air temperature and physiological equivalent temperature (PET), with higher correlation coefficient and thermal sensation. 3) Human being's thermal perception and cognition suggests that the thermal environment of the square is in a more severe situation in summer. 4) Openness is the main reason for people to come to the square in autumn and winter, which affects people's thermal perception of the square. 5) Guoge Square has more broad thermal neutral range than the KIC Square, which may be caused by the coupling effect of square form and behavioral factors. Those findings in this paper may serve as the theoretical foundation for the future design of square of high density in Shanghai.

**Key words:** landscape architecture; urban square; micro-climate; thermal perception; space form

1个世纪以来，地域气候对设计的影响从人们居住的室内空间走向人们活动的户外空间，成为多学科关注的焦点。在全球气候变化和快速城市化的影响下，中国风景园林学者正在积极关注气候对城市户外空间环境的影响。本课题组已经针对上海“三类九种”城市户外空间开展了持续3年的研究。

在城市广场类别中，围绕风景园林小气候系统功效形成要素、风景园林小气候适应性空间要素与空间形态结构和风景园林小气候适宜性物理评价与感受评价已取得一些成果[1-4]。依托于景观环境形象、环境生态绿化、大众行为心理三元素对于人们环境感受所起的作用是相辅相成、密不可分的这一理论支撑[5]，本研究尝试探索城市广场空间形态、热环境和使用者心理感知之间的关系。

1 研究方法

1.1 实验场地

上海市地处东经120°52′~122°12′，北纬30°52′~31°53′，平均海拔4m；属亚热带季风性气候，为夏热冬冷气候区，7、8月份气温最高。

本研究的实验地——上海创智天地广场位于杨浦区创智天地产业园区内，广场整体下沉4m，四周有25m高的商业写字楼。如图1所示，广场总平面成T字形，主广场为东北—西南走向(北偏东60°)，长约120m，宽约50m，副广场与主广场垂直，长约120m，宽约40m。图1中标注了广场区、悬挑区和草坪区3个部分及测试点位置。图2是各区人视及鱼眼照片；场地空间形态测量仪器主要有鱼眼镜头和超声波测距仪。各区空间形态基本情况见表1。

1.2 小气候测试

本研究测试了空气温度、相对湿度、风速和太阳辐射等小气候因子。测试仪器采用美国生产的Watchdog小型气象站。设备装配在1个1.5m高的三脚架上，与成人头部、颈部高度接近，设定为每10min自记1次。

实验在2016年的8月、11月和12月晴朗少云的天气进行，夏秋两季各3天，冬季4天，共计10个测试日。每个测试日的实验开始时间为7：00；结束时间受到日落的影响：夏季为18：30，秋季为17：30，冬季为17：00。

1.3 热舒适指标

本研究选择生理等效温度(PET) ①作为热舒适评价指标。它被定义为在某一室内或户外环境中，人体皮肤温度和体内温度达到与典型室内环境同等的热状态时所对应的气温。尽管预测平均投票(PMV)、标准有效温度(SET\*)和生理等效温度(PET)3个指标均基于人体能量平衡，但生理等效温度(PET)更适用户外热舒适评估[6]。

1.4 问卷调查

受访者为自发在广场上进行休闲活动的人们，调研问卷包含受访者的基本信息、实时热感觉和热认知3个部分。基本信息记录受访者的性别、年龄、身高、体重、衣着、活动状态、在外活动时间等；实时热感觉记录受访者总的热感觉、热舒适、热可接受度和热偏好，以及对各小气候因子的感知和偏好；热认知记录受访者对四季、广场各空间的舒适判定及来访原因和目的等内容。

热感觉投票(TSV)使用9点标度(非常冷、冷、微冷、凉、不冷不热、暖、微热、热、非常热)，热舒适投票(TCV)使用4点标度(非常不舒适、不舒适、舒适、非常舒适)，热偏好投票(TPV)使用3点标度(变冷、不变、变热)，各小气候因子的热感觉和热偏好分别使用5点和3点标度。

2 结果

2.1 各测点小气候情况

10个测试日中各测点小气候因子总体情况如下：空气温度范围1.7~36.8℃，相对湿度范围30.4%~97.1%，风速范围0~4.5m/s，太阳辐射范围30~1 073wat/m2。图3~6是夏秋冬各季节各测点空气温度、相对湿度、风速和太阳辐射4种小气候因子逐时平均值变化图。总体上，各测点空气温度和相对湿度变化较为一致，差别较小；太阳辐射和风速差别较大。夏秋冬三季太阳辐射总趋势为广场区＞草坪区＞悬挑区，此趋势与SVF关系一致。冬季草坪区太阳辐射略高于广场区，原因在于草坪区更早获得日照；风速总趋势为悬挑区＞广场区＞草坪区，悬挑区由于产生了狭管效应，风速最大。

表1各测点空间形态基本情况

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 测点 | SVF | H/D | 长边垂直界面方向 | 开口方向 |
| 广场区 | 0.612 | 0.3 | 北偏东60° | 东北-西南 |
| 悬挑区 | 0.142 | 0.6 | 北偏西30° | 西北-东南 |
| 草坪区 | 0.504 | 0.6 | 北偏西30° | 西北-东南 |

2.2 问卷情况

夏秋冬三季共获得870份有效问卷。秋季问卷356份，夏季问卷280份，冬季问卷234份问卷(表2)。

2.2.1 热感觉、热舒适与热期望

图7是夏秋冬三季热感觉分布情况。一半以上的人在秋冬两季均能获得中性热感觉，在夏季感觉微热至非常热(TSV=2，3，4)占比41.4%，在冬季感觉到微冷和冷占比22.4%。夏秋冬三季感知舒适和非常舒适的占比依次为84.7%、91.6%、76.5%，秋季最高，冬季最低。夏季，62.9%的人期望更加凉爽，冬季，59.8%的人期望更加温暖。

为了揭示人们在夏冬两季热感觉和热舒适的不对应性，本研究进一步分析热感觉和热舒适值之间的关系。图8显示了夏秋冬三季每一级热感觉所对应的热舒适投票平均值，其二项式如下：

TCV夏=-0.191TSV2+0.121TSV+1.093(R2=0.989)；

TCV秋=-0.166TSV2+0.138TSV+1.19(R2=0.962)；

TCV冬=-0.081TSV2+0.331TSV+0.791(R2=0.927)。

热感觉与热舒适的关系随着季节发生变化：夏季，当TSV为0.32时，人们感觉最为舒适；秋季，当TSV为0.42时，人们感觉最为舒适；冬季，当TSV为2.04时，人们感觉最为舒适。

同样的方法被用来揭示热偏好投票与热感觉之间的关系(图9)，所得一元回归方程如下：

TPV夏=-0.192TSV-0.330(R2=0.725)；

TPV秋=-0.288TSV+0.250(R2=0.836)；

TPV冬=-0.252TSV+0.362(R2=0.885)。

夏秋冬三季人们偏好不变时所对应的热感觉分别为-1.72、0.87和1.44，人们在夏季期望更加凉爽，在秋冬两季期望更加温暖。

 使用斯皮尔曼等级相关分析法进一步揭示热感觉、热舒适和热期望与小气候要素及PET之间的关系。空气温度、PET与热感觉和热舒适显著正相关，与热期望显著负相关，热舒适与空气温度和PET的相关系数较低(表3)。

2.2.2 热中性温度与热舒适范围

由于热感觉与热舒适随着季节变化而变化，按季节计算热中性温度和舒适范围变得十分必要。使用PET作为客观评价指标，首先计算每一度PET对应的热感觉均值，从而计算热中性温度和热中性范围(图10)。

MTSV夏=0.085PET-1.667(R2=0.750)；

MTSV秋=0.048PET-1.084(R2=0.606)；

MTSV冬=0.070PET-1.649(R2=0.766)。

当TSV=0时，夏秋冬各季对应的PET分别为19.6℃、22.5℃和23.6℃。TSV在-0.5~0.5对应的中性范围分别为19.6±5.9℃PET、22.5±10.4℃PET、23.6±7.1℃PET。

使用同样方法计算每一度PET对应的热舒适范围(图11)，夏秋冬各季最为舒适时对应的PET值分别为17.5℃、22.9℃和30℃；当TCV≥1时对应的舒适范围分别为17.5±4.1℃PET、22.9±9.2℃PET和30±6.8℃PET。②

MTCV夏=-0.002PET2+0.070PET+0.421(R2=0.746)；

MTCV秋=-0.004PET2+0.183PET-0.753(R2=0.788)；

MTCV冬=-0.002PET2+0.12PET-0.709(R2=0.676)。

为了便于与国歌广场所获得的数据进行比较，本研究计算了夏秋冬三季平均热感觉、平均热舒适与生理等效温度之间的关系(图12)。

MTSV三季=0.078PET-1.626(R2=0.915)；

MTCV三季=-0.003PET2+0.143PET-0.574(R2=0.816)；

当TSV=0时，热中性值为20.8℃PET，当TSV在-0.5~0.5时，热中性范围为20.8±6.4℃PET；当PET为23.8℃时，人们最为舒适，当TCV≥1时，对应的热舒适范围为23.8±6.6℃PET。

2.2.3 小气候要素数感知与偏好

夏季60%以上的访问发生在悬挑区，秋冬两季，90%以上的访问发生在广场区。图13是夏秋冬三季小气候要素感知占比。在夏季，感知温度适中的人占比为65%，34.7%的人认为空气温度高，感知湿度和风速适中的人占比分别为77.1%和60.4%，感知日照适中的占比为36.1%，有47.2%的人认为日照低；在秋季，感知温度和湿度为适中的人占比最大，分别为69.1%和68.5%，67.8%的人感知风速低，42.7%的人感知日照低；冬季，温度与日照感知较为一致，感知适中的占比分别为53%和54.3%，感知低的占比分别为46.6%和40.2%；风速和湿度的感知以适中居多，分别为95.3%和71.8%。



图3 夏秋冬测试日空气温度均值

图14是3个季节人们对小气候要素偏爱占比情况。夏季，人们期望温度、湿度和日照均降低，占比分别为69.3%、25.7%和37.9%，41.1%的人期望风速升高；秋季，对温度、湿度、风速和日照期望不变的占比均超过60%，期望温度、日照升高的占比均为36%；冬季，期望温度和日照升高的人分布为57.3%和59.4%，期望风速降低的人为40.2%，84.2%的人期望湿度不变。3个季节中，大多数人都期望湿度不变；人们在夏季期望更低的温度、日照和更高的风速，冬季则刚好相反。

使用斯皮尔曼等级相关分析法进一步揭示小气候偏好与小气候要素值之间的关系如下：温度偏好、风速偏好和日照偏好受空气温度影响显著。

2.2.4 热认知情况

对四季不舒适的投票占比中，夏季超过90%，冬季50%，夏秋各10%；在夏季超过70%的认为广场区不舒适，秋冬两季超过80%的人认为悬挑区不舒适，前者是因为暴晒，后者是由于无阳光和风大；3个季节中人们对草坪区的舒适认知均比较低，仅10%。如图15所示，开阔、热舒适、离家近是人们来此广场的主要原因，在夏季，热舒适占比最高；在秋冬两季，开阔占比最高。

2.3 场地舒适空间评估

将3个空间在夏、秋、冬各季的生理等角温度均值与各季节热舒适范围相比较，如图16所示，在夏季，3个空间的生理等效温度均高于舒适上限，悬挑区最靠近舒适范围；秋季，悬挑区在舒适范围之外，广场区、草坪区对应舒适时间占比分别为65.7%、76.6%；冬季，只有草坪区在正午能够达到舒适范围。

3 讨论

3.1 广场形态与热环境

朝向、高宽比(H/W)、天空视觉因子(SVF)等形态因子对城市热环境影响显著[7]。在本研究中，3个测点的空气温度和相对湿度在各季节变化较为一致且差异不明显，这与课题组使用计算机模拟结果较为一致，模拟发现广场高宽比及朝向对空气温度和相对湿度无明显影响，对风影响显著[8]。广场各测点风环境比较复杂，悬挑区有较大的风速主要原因可能是“狭管”效应，悬挑上方建筑物的遮挡，使得下方局部风速增大；广场区的风速大于草坪区可能是由于广场区更低的高宽比产生了“风扫”效应；悬挑区的太阳辐射受SVF影响显著，广场区与草坪区的太阳辐射差异较小的原因可能在于SVF与太阳辐射的关联度，有学者通过计算机模拟发现，当SVF值从0.1逐渐增大到0.5时，SVF与热环境的关联度值逐渐降低[9]。

3.2 热中性与热舒适

热中性是人们感觉不冷不热的状态，热舒适是人们对热环境表示满意的意识状态。本研究发现各季节之间人们的热中性差值为1~3℃PET，这一差值略高于Cohen和Lin的研究[6，10]。人们在各热舒适的差值高达5~10℃PET，显著表明在夏季越凉爽越舒适，冬季越温暖越舒适。各季节的热中性和热舒适的范围相比较，秋季最宽，冬季其次，夏季最窄，这与人们对广场热认知结果一致，人们认为在广场夏季热环境较为严峻。

3.3 广场形态与热认知

广场区与草坪区拥有相似的热环境，人们对广场区的热认知却远远高于草坪区，这可能受到广场形态与人们活动需求的综合影响。在夏季，热舒适作为人们来广场区活动的主要原因时，人们判断悬挑区最舒适；在秋冬两季，空间开阔成为人们来广场活动的最主要原因时，人们判断广场最舒适。本研究进一步支持了Lenzholzer提出的人们视觉认知或空间认知与小气候认知存在关联性[11]。

3.4 两个广场热中性范围比较

本研究比较了创智天地广场与国歌广场热中性范围的差异，创智天地广场热中性范围为14~27℃PET③，国歌广场热中性范围7~25℃PET，后者较前者更为宽广。2个广场受访者经历的空气温度范围基本一致，因此并不能像比较不同地区的中性范围一样将其归因于空气温度变化范围宽窄；从受访人群上也很难将其归因于社会文化差别。Nasir曾证实在特定的小气候环境中人们的活动偏好和热感知显著相关[12]，广场形态和人们活动的耦合作用可能影响了人们的热中性范围。作为活动的发生器，创智天地广场上的受访者活动类型单一，仅仅驻足、坐憩，而国歌广场有更多的绿色覆盖和更小的空间单元，促进了打拳、散步、跳舞等活动的发生。

4 结论

本文对上海创智天地广场进行了夏秋冬三季共计10d的小气候物理实验和大众心理感知研究，验证了广场空间形态、热环境与人的心理感知三者之间密切相关。

广场朝向、高宽比(H/W)、天空视觉因子(SVF)等形态因子与热环境关系紧密：更小的SVF适用于夏季，更大的SVF适合于秋冬两季；热舒适是比热中性更为狭窄的范围并且更难获得，热舒适与热感觉均与空气温度和PET显著相关，热感觉与空气温度和PET的相关系数更高。人们的热感觉与热认知较为一致的是广场夏季热环境较为严峻，空间开阔是人们在秋冬两季来广场的主要原因，它影响了人们对广场各区的热认知；创智广场的热中性范围低于国歌广场，国歌广场空间形态与人们活动的耦合可能影响了人们的热中性范围。

遮阴与开阔是上海地区广场设计的必备条件。未来的研究将继续关注空间开阔对热认知的影响以及空间形态与行为活动的耦合对热中性范围的作用，进一步揭示广场空间形态、热环境与心理感知之间的关系，为创造更加适宜的广场空间提供依据。

注：文中图片均由作者绘制。

致谢：感谢同济大学建筑与城市规划学院提供的帮助；感谢博士生连泽峰、刘鸣以及硕士生李凌舒对数据收集提供的帮助。

**注释**：

① 来源：上海市气象信息传媒中心，2011-3-21，12：34。

② 来源：中国天气网讯中央气象台11月18日06时继续发布寒潮蓝色预警。

③ 澎拜新闻：《大风蓝色预警19时整刚刚发布！上海将有7到8级偏北大风》。

参考文献：

[1] 刘滨谊，张德顺，张琳，等.上海城市开敞空间小气候适应性设计基础调查研究[J]. 中国园林，2014，30(12)：17-22. （黑体-6.5点 行距11点）

[2] 刘滨谊，魏冬雪，李凌舒. 上海国歌广场热舒适研究[J]. 中国园林，2017，33(4)：5-11.

[3] Liu B Y, WEI D X. Winds of change in Shanghai[J]. Landscape Institute, 2017(Autumn): 45-51.

[4] 张德顺，王振.高密度地区广场冠层小气候效应及人体热舒适度研究：以上海创智天地广场为例[J]. 中国园林，2017，33(4)：18-22.

[5] 刘滨谊. 景观规划设计三元论：寻求中国景观规划设计发展创新的基点[J]. 新建筑，2001(5)：1-3.

[6] Lin T P. Thermal perception, adaptation and attendance in a public square in hot and humid regions[J]. Building & Environment, 2009, 44(10): 2017-2026.

[7] 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 & Sustainable Energy Reviews, 2016, 54: 1002-1017.

[8] 邱蒙.上海城市广场空间垂直界面影响小气候量化测析[D].上海：同济大学，2015.

[9] 史兵，汪新，赵冬. 天空开阔度对城市住宅小区热环境影响的数值模拟[J]. 应用力学学报，2017，34(6)：1181-1186；1227.

[10] Cohen P, Potchter O, Matzarakis A. Human thermal perception of Coastal Mediterranean outdoor urban environments[J]. Applied Geography, 2013, 37: 1-10.

[11] Lenzholzer S, Koh J. Immersed in microclimatic space: microclimate experience and perception of spatial configurations in Dutch square[J]. Landscape & Urban Planning, 2010, 95(1): 1-15.

[12] Nasir R A, Ahmad S S, Ahmed A Z. Physical Activity and Human Comfort Correlation in an Urban Park in Hot and Humid Conditions[J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2013, 105(2): 598-609.

(编辑/)