

# 天穹扇区对夏季广场小气候及人体热舒适度的影响

## Influence of Vault Sector on Summer Square Microclimate and Human Thermal Comfort

张德顺 王振

ZHANG Deshun, WANG Zhen

中图分类号: TU986

文献标识码: A

文章编号: 1673-1530(2018)10-0027-05

DOI: 10.14085/j.fjyl.2018.10.0027.05

收稿日期: 2018-01-26

修回日期: 2018-07-30

张德顺/1964年生/男/山东人/博士/同济大学建筑与城市规划学院教授、博士生导师/研究方向为园林植物与生态规划(上海200092)

ZHANG Deshun, born in 1964 in Shandong Province, Ph.D., is a professor and doctoral supervisor in the College of Architecture and Urban Planning, Tongji University. His research focuses on landscape plants and ecology planning (Shanghai 200092).

王振/1988年生/男/山东人/同济大学建筑与城市规划学院在读博士研究生/研究方向为风景园林小气候(上海200092)

WANG Zhen, born in 1988 in Shandong Province, is a doctoral candidate in the College of Architecture and Urban Planning, Tongji University. His research focuses on landscape microclimate (Shanghai 200092).

**摘要:** 为揭示广场中不同遮蔽情况在太阳运行条件下,小气候及人体热舒适度的变化特征,根据天球模型、太阳视运动轨迹原理,在测点天空鱼眼照片上,叠加日轨图和天空图,绘制成天穹图。以上海广场为研究对象,通过对其夏季日间小气候的实地测量和热舒适度的计算,分析天空开阔度对日间小气候和热舒适度的影响,比较天空开阔度和太阳运行所在扇区天空开阔度对日间不同时刻小气候和热舒适度影响的差异,通过组间差异分析、相关性分析和热舒适度分析定位出对小气候和热舒适度影响最大的时间和天穹范围,为广场适宜性小气候设计提供更具体准确的设计思路和指导。

**关键词:** 风景园林; 太阳视运动轨迹; 天空开阔度; 天穹扇区; 广场小气候

**Abstract:** This paper is to reveal the variation characteristics of microclimate and human thermal comfort under different shading conditions in the square while the sun is in orbit. According to the celestial sphere model and the principle of the trajectory of the solar apparent motion, we have superimposed the sun-orbit map and sky map on the sky fish-eye photos to draw a map of the sky. We took Shanghai Square as the object of study. Through field measurement of the summer daytime microclimate and calculation of the thermal comfort, we analyzed the influence of sky view factor on daytime microclimate and thermal comfort. We also compared the effects of sky openness and that of the sector in the sun's orbit on the microclimate and thermal comfort at different times of a day. The most vulnerable time, range and spatial positions of the microclimate and human thermal comfort were positioned by inter-group difference analysis, correlation analysis and human thermal comfort analysis. They would provide more concrete and accurate ideas and guidance for the design of suitable microclimate for the square.

**Keywords:** landscape architecture; algorithms of the sun's orbit; sky view factor (SVF); vault sector; square microclimate

人们对户外活动的需求与全球变暖、城市热岛、户外环境小气候恶劣的矛盾日趋激烈,上海近年高温日数、高温热浪事件发生频次、日数、强度等不断在增加,在强太阳辐射和周边建筑反射热的综合影响下<sup>[1]</sup>,广场夏季热环境越来越差<sup>[2]</sup>,由于广场具有集散、交通、商业等基本功能,硬质铺装面积较大,小气候环境难以满足人们的舒适要求,因此夏季广场小气候调控亟待加强。

太阳辐射是广场主要能量来源,场地的热湿环境、风环境、光照环境和大气环境等小气候环境都受到太阳辐射的直接影响<sup>[3]</sup>,研究太阳辐射对城市广场小气候及人体热舒适度的影响是广场小气候研究的基础。建筑、构筑物、植物对场地形

成的围合和遮蔽可直接影响太阳辐射,以增加阴影区面积为目的的提高围合度可以降低日间空气温度和提高热舒适度<sup>[4]</sup>,树冠不仅能减弱日间太阳辐射,还能减少晚上热流从地面到天空<sup>[5-6]</sup>。在城市<sup>[7-8]</sup>、街道<sup>[9-10]</sup>、广场或建筑周边开放空间尺度<sup>[11-12]</sup>上,均发现天空开阔度(Sky View Factor,简称SVF)与城市热岛强度(Urban Heat Island Intensity,简称UHII)、场地内部空气温度呈密切负相关,建筑围合形态及乔木的改变可以控制场地SVF,影响场地局部的热舒适<sup>[13]</sup>。然而,以往研究多把SVF作为一个整体进行研究,较少考虑在太阳运动的时间和季节差异情况下SVF对场地小气候及热舒适度的影响。

为了揭示天穹扇区对小气候和舒适度的影响,对上海市区4个广场进行实例研究和量化分析。首先研究SVF对广场小气候及热舒适的影响;然后将天穹分为若干扇区,通过太阳视运动轨迹图(Daytrack,简称日轨图)将各时间点的太阳位置定位到扇区,研究各扇区天空开阔度(Sky View Factor in Skymap Sectors,简称SVF<sub>sectors</sub>)对小气候及热舒适的影响;最后得到影响广场小气候的关键扇区,为改善适宜性小气候广场规划设计提供理论参考和对策。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区域气候条件

测试场地位处上海市区,属亚热带海洋性季风气候,四季分明,夏季炎热,高温高湿。根据上海市气象中心统计数据,上海市最高温度多出现在7、8月份;1991—2013年间,7、8月平均气温为28.6°C、28.1°C,最高温度为40.6°C、41.2°C。

### 1.2 立地区位及测点布置

测试地点为上海市长宁区海粟绿地广场、杨浦区创智天地广场和国歌纪念广场、浦东新区世纪广场,共布置46个测点(图1)。按广场冠层性质分,测点中有建筑、花架、常绿落叶植物、无冠层等;按下垫面性质分,测点中有花岗岩、混凝土、草坪、水泥砖等。测试场地分布均匀,涵盖常见广场的冠层和下垫面类型,具有研究的普遍意义。

### 1.3 测试仪器及方法

小气候测量仪器为美国Spectrum Technologies产WatchDog Model 2900ET小型气象站,数据采集时间间隔为10min,测试在2015年7月14日—8月2日的晴朗少云、大气候条件相似的情况下进行,创智天地广场、国歌纪念广场、世纪广场各测试3天,每个广场测试期间,海粟绿地广场与之同时测试,共测试9天。监测数据有空气温度、相对湿度、太阳辐射、风速,数据采集时空气温度和相对湿度传感器的高度为1.5m。

SVF测量采用Canon 60D相机搭载视角范围为对角线180°的4.5mm f/2.8鱼眼镜头。在测点拍摄天穹照片(表1),并叠加日轨图<sup>[14]</sup>

表1 鱼眼镜头照片  
Tab. 1 Fish eye lens photo

| SVF          | 鱼眼照片 |
|--------------|------|
| SVF: 0~0.2   |      |
| SVF: 0.2~0.4 |      |
| SVF: 0.4~0.6 |      |
| SVF: 0.6~1   |      |

表2 SVF聚类分组结果  
Tab. 2 SVF clustering results

| 聚类分组    | I                                 | II                     | III               | IV  |
|---------|-----------------------------------|------------------------|-------------------|---|
| SVF取值范围 | 0~0.2                             | 0.2~0.4                | 0.4~0.6           | 0.6~1   |
| 测点编号    | 6、7、11、23、24、31、32、33、34、42、45、46 | 8、14、19、21、22、41、43、44 | 17、20、37、38、39、40 | 1、2、3、4、5、9、10、12、13、15、16、18、25、26、27、28、29、30、35、36 |

表3 SVFsectors聚类分组结果  
Tab. 3 Cluster analysis of SVFsectors

| 聚类分组                        | I     | II      | III     | IV    |
|-----------------------------|-------|---------|---------|-------|
| SVF <sub>sectors</sub> 取值范围 | 0~0.3 | 0.3~0.6 | 0.6~0.8 | 0.8~1 |

和天空图(Skymap,扇区划分时高度角分24份,方位角分12份),制成文中使用的天穹图,计算测点SVF及SVF<sub>sectors</sub>值。

使用生理等效温度(Physiologically Equivalent Temperature,简称PET)作为广场人体热舒适度(Human Thermal Comfort,简称HTC)评价指标,PET是由Höppe和Mayer基于MEMI(Munich Energy Balance Model for Individuals)模型提出的人体热舒适度指标<sup>[15]</sup>,PET可等效于人体在维持体内和体表温度达到人体热量平衡时相对应的典型室内环境中的空气温度<sup>[16]</sup>,体现了人体能量平衡和室外空间长波辐射通量的相互关系,是最合适的户外人体热舒适度评价指标<sup>[17]</sup>。根据测得的太阳辐射、空气温度、相对湿度和风速数据,在人体因素为175cm高、70kg重的35岁男性,服装热阻为0.5clo,新陈代谢率取80W/m<sup>2</sup>条件下,使用Rayman热环境评价软件计算PET。

## 2 天空开阔度对小气候及人体热舒适度的影响

对实验中所有测点进行SVF的模糊分类,研究SVF对日间小气候和热舒适度的影响,得出SVF与小气候和热舒适度的回归模型。

### 2.1 天空开阔度聚类分组

使用欧式距离平方(Squared Euclidean Distance)对46个测点的SVF进行组间连接的系统聚类,将测点分为4组,I到IV组

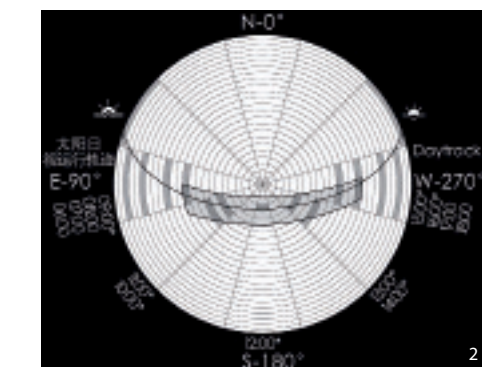
SVF增大(表2),计算各组SVF、小气候和热舒适度均值,相邻两组间各均值的增(减)率,发现各组的空气温度和相对湿度的差异最小,最大增(减)率不足7%和4%,说明SVF的变化对空气温度和相对湿度的影响较小;I/II组和II/III组的表面温度、太阳辐射和热舒适度增长率明显高于III/IV组,说明3个指标值随SVF增加而增加,且SVF在0~0.6之间变化较大,超过0.6以后变化幅度较小;I/II组和III/IV组的风速增长率明显高于II/III组,说明SVF在0.2~0.6之间时变化较小,在0~0.2和0.6~1区间中随SVF增加而增加,且变化较大。

### 2.2 相关性分析

为描述空间围合与小气候和热舒适度线性相关强弱的程度,对各测点的SVF与小气候和热舒适度的日均值进行Pearson相关分析发现,SVF与表面温度、太阳辐射、热舒适度间呈极高度正相关(0.8以上),与空气温度、风速呈高度正相关(0.6~0.8),与相对湿度呈中度负相关(0.4~0.6)。

### 2.3 线性回归分析

根据Pearson相关分析结果,对各个测点的SVF与标准化<sup>[18-19]</sup>后的小气候和热舒适度进行回归分析。由线性倾向率可知,空间围合对小气候及热舒适指标的影响力排序为太阳辐射>表面温度>热舒适度>风速>空气温度>相对湿度,R<sup>2</sup>显示,表面温度、太阳辐射、风速和热舒适度的拟合度较高,相对湿度和



1 测试场地区位与测点图  
Test site location and measuring points  
2 天穹图  
Sky map

空气温度的拟合度较低。因此在适宜性小气候设计中可根据空间围合情况，通过线性模型表达式预测夏季小气候和热舒适度。

### 3 扇区天空开阔度对小气候及人体热舒适度影响

SVF 是体现测点围合情况的固定值，但太阳位置始终在变化，当考虑太阳位置与测点实时遮蔽情况对小气候和热舒适度的影响时，需要将太阳实时位置定位到天穹图的扇区上，分析该时刻所在扇区的  $SVF_{sectors}$  对小气候及热舒适度的影响。

#### 3.1 太阳视运动轨迹分析

当太阳运行到某时刻时，在日面中心一观测点连线上若有遮挡物，太阳辐射将无法到达测点，在天穹图（图 2）上，该时刻的太阳视运动轨迹线下有遮挡物。太阳运动的时间与广场冠层的空间共同影响了测点的遮蔽状况及能量变化。

#### 3.2 $SVF$ 、 $SVF_{sectors}$ 与小气候及人体热舒适度相关性分析

比较 8:00 至日落间的整点小气候和热舒适度与  $SVF$  和  $SVF_{sectors}$  的 Pearson 相关系数，其中，相对湿度取绝对值，当  $SVF_{sectors}$  的相关系数大于  $SVF$  时，扇区的遮蔽条件对小气候和热舒适度的影响比整体遮蔽条件大，反之亦然。测点四周的围合对风速的影响强于上空扇区的遮蔽，故  $SVF_{sectors}$  对风速的影响弱于  $SVF$ 。17:00 以后  $SVF$  与小气候和热舒适度的相关系

数均大于  $SVF_{sectors}$ ， $SVF$  对小气候影响较大；对 8:00—16:00， $SVF_{sectors}$  的相关系数小于  $SVF$  的情况进行统计，表面温度和太阳辐射各有 1 处，仅相差 0.001 和 0.004，热舒适度无，相对湿度 4 处，空气温度 5 处（图 3），研究该时段  $SVF_{sectors}$  对小气候和热舒适度影响为可行。

#### 3.3 关键扇区选择

关键扇区是指一天中，太阳运行所在扇区的遮蔽条件对小气候和热舒适度影响最大，且热舒适度最差时段的区域。在关键扇区的选择时，要考虑  $SVF_{sectors}$  对小气候和热舒适度的影响强于  $SVF$ ， $SVF_{sectors}$  对小气候和热舒适度的影响具有统计学上意义，关键扇区所对应的时段内，热舒适度可改善的空间大，即热舒适度最差。因此，通过分析各  $SVF_{sectors}$  分组对小气候和热舒适度作用的组间差异、 $SVF_{sectors}$  与小气候和热舒适度的相关性和热舒适度 3 方面的对关键扇区进行分析、选择。

##### 3.3.1 扇区天空开阔度聚类分组

$SVF$  是天穹图中所有扇区  $SVF_{sectors}$  之和，每环的最大  $SVF_{sectors}$  均不同。对各扇区天空开阔度进行标准化为 0~1 的无量纲量，0 为全遮蔽，1 为无遮蔽。将太阳视运动中整点及日落时太阳所在扇区的标准化后天空开阔度（ $SVF'_{sectors}$ ）进行系统聚类，将测点分 4 组（表 3），I 到 IV 组的归一后扇区天空开阔度增大，即天空越来越开阔。

##### 3.3.2 组间差异分析

对 I 和 IV 组作单因素方差分析，两组差

异性显著的时间段可作为关键扇区的时段，比较发现（图 3），8:00—15:00 中，I 和 IV 组之间的各项小气候和热舒适度指标差异性均为显著水平以上；16:00—17:00，I 和 IV 组之间在表面温度、太阳辐射、空气温度、风速和 PET 的差异性均为显著水平以上，在相对湿度上，两组差异性呈不显著水平；18:00 后，各项指标的 I 和 IV 组差异性均为不显著。

##### 3.3.3 相关性分析

为描述关键扇区的遮蔽程度与小气候和热舒适度线性相关关系，对各测点数据整点时太阳视运动轨迹所在扇区的  $SVF_{sectors}$  与当时小气候和热舒适度进行 Pearson 相关分析，并将相对湿度的相关系数取绝对值（图 4），根据相关程度的划分标准及研究中的具体情况，视相关系数 0.6~1.0 为相关，其他为不相关，相关系数即作为关键扇区划分的标准之一。在 8:00—16:00 中，表面温度、太阳辐射、PET 均与  $SVF_{sectors}$  为相关，17 时后仅太阳辐射与  $SVF_{sectors}$  为相关；空气温度与  $SVF_{sectors}$  在 8:00—11:00、相对湿度与  $SVF_{sectors}$  在 8:00—10:00 相关，风速全天与  $SVF_{sectors}$  均为不相关。

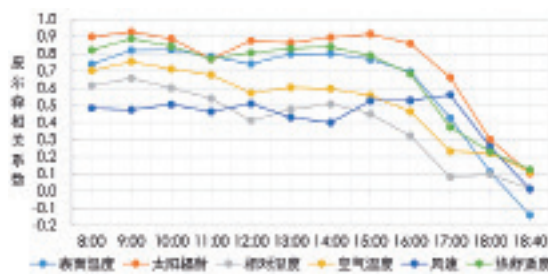
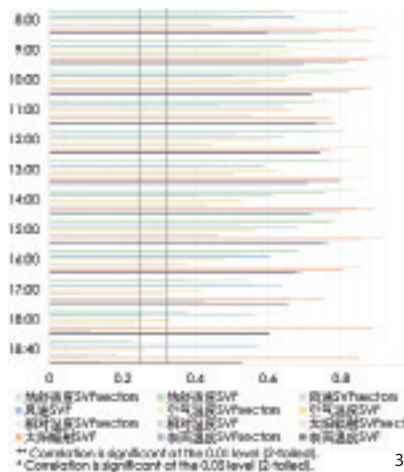
##### 3.3.4 热舒适度分析

PET 越高， $SVF_{sectors}$  对热舒适度的改善效果越明显，依据 PET 热感受和生理应激等级，取热感受为炎热，生理应激等级为极端热应激的  $41^\circ\text{C}$  [20] 作为关键扇区选择标准之一。测试中，I 组 PET 均低于  $41^\circ\text{C}$ ，日均值为  $32.208^\circ\text{C}$ ；IV 组在 9:00—16:00，PET 均在  $41^\circ\text{C}$  以上，平均  $45.112^\circ\text{C}$ ，其他时段 PET 均低于  $41^\circ\text{C}$ ，日均值为  $41.601^\circ\text{C}$ 。 $SVF$  较高的 IV 组 PET 明显高于  $SVF$  较低的组。

##### 3.3.5 重点时段与关键扇区选择

由 9:00—16:00 的小气候和热舒适度发现，I 和 IV 组 PET 差值的平均为  $11.62^\circ\text{C}$ ，两组其他时段平均相差不足  $5.00^\circ\text{C}$ ；表面温度差值平均为  $12.39^\circ\text{C}$ ，两组其他时段差值的平均仅为  $1.610^\circ\text{C}$ ；太阳辐射差值的平均为  $549.8\text{W}/\text{m}^2$ ，两组其他时段差值的平均仅为  $125.10\text{W}/\text{m}^2$ 。两组的空气温度、相对湿度、风速数据的差值比其他时段大，但并不明显，原因是空气温度和相对湿度的数据是在遮阳通风的百叶箱中采集，不易受太阳辐射影响，





3 小气候要素及热舒适度与 SVF、SVF<sub>sectors</sub> 相关性比较  
Relevance of microclimate, HTC and SVF, SVF<sub>sectors</sub>  
4 SVF<sub>sectors</sub> 与小气候要素和热舒适相关性分析  
Relevance of microclimate, HTC and SVF<sub>sectors</sub>  
5 重点时段选择图  
Selection of key periods of time

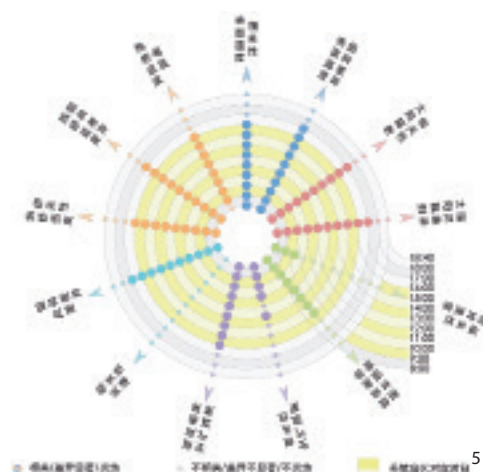


表 4 重点时刻太阳位置汇总表

Tab. 4 Summary of solar positions in key moments

| 时刻     | 太阳位置   | 夏至日   | 7月1日  | 测试日   | 8月31日 | 关键扇区边界范围 |
|--------|--------|-------|-------|-------|-------|----------|
| 9: 00  | 高度角 /° | 50.4  | 49.9  | 47.5  | 43.6  | 43~50    |
|        | 方位角 /° | 90.1  | 90.3  | 95.9  | 109.2 | 90~110   |
| 12: 00 | 高度角 /° | 82.2  | 81.9  | 77.6  | 67.6  | 67~82    |
|        | 方位角 /° | 186.7 | 183.3 | 179.1 | 183.2 | 180      |
| 16: 00 | 高度角 /° | 35.9  | 36.2  | 35.0  | 29.1  | 29~36    |
|        | 方位角 /° | 277.8 | 277.2 | 272.1 | 262.4 | 262~277  |

故关键扇区的天空开阔度对其影响较小，风速受周边环境的围合程度影响较大，关键扇区较小且位置多在测点上方，对风的阻滞或引导作用较小。

热舒适度是表征人体热感受的直观指标，也是衡量广场小气候的综合指标。在关键扇区选择时首先应考虑 SVF<sub>sectors</sub> 的影响强于 SVF，再考虑热舒适的状况。最后对 SVF<sub>sectors</sub> 组间差异、SVF<sub>sectors</sub> 与小气候和热舒适度的相关性进行考量，综合分析 4 方面因素（图 5），关键扇区对应的时间为 9: 00—16: 00，测试时间为上海夏季最炎热的时期，所得 9: 00—16: 00 太阳运行所在关键扇区时段可以作为夏季的标准。

测试时间短而集中，太阳视运行轨迹约为一曲线，为得到全夏季小气候关键扇区，根据上海 1991—2013 年气象数据，上海气温最高月份在夏至以后的 7、8 月；将夏至日、测试日（均值），7 月初和 8 月底的 9: 00、12: 00 和 16: 00 太阳位置汇总（表 4）。

#### 4 实测结论

通过对上海 4 处广场 46 个测点的 SVF 和小气候的实地测定，从 SVF 和 SVF<sub>sectors</sub> 两方面研究天空开阔度对小气候和热舒适度的影响，得到如下结论：1) SVF 方面，系统聚类分组发现，SVF 对表面温度、太阳辐射、热舒适度、风速影响较大，在最空旷和最郁闭时，风速更易受到 SVF 的影响，在最空旷时，SVF 对表面温度、太阳辐射、热舒适度的影响弱于较郁闭情况；相关性分析发现，SVF 与表面温度、太阳辐射、热舒适度呈极高度正相关，与空气温度、风速呈高度正相关，

与相对湿度呈中度负相关；线性回归分析发现，表面温度、太阳辐射、热舒适度和风速的线性倾向率和拟合度较大，可以通过线性回归模型进行预测。总之，SVF 对广场表面温度、太阳辐射、风速和热舒适度的影响较大。2) SVF<sub>sectors</sub> 方面，8: 00—16: 00，SVF<sub>sectors</sub> 对小气候和热舒适度的影响比 SVF 大，17: 00 至日落，SVF 的影响作用更大；影响夏季广场小气候和热舒适度的关键扇区是 9: 00—16: 00 太阳运行所在扇区；根据测试日所得关键扇区方法，推论至整个夏季小气候，综合 7、8 月太阳视运动轨迹，绘制出影响上海夏季小气候的关键扇区及能始终处于阴影中的最小遮蔽物的空间位置。

#### 5 设计策略

##### 5.1 设计思路

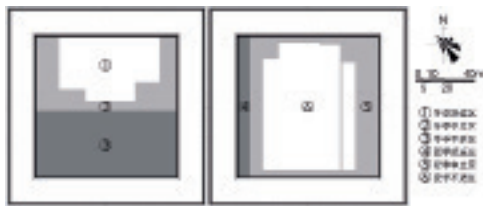
在大气条件影响下，不同季节、着衣条件、活动类型对太阳辐射的要求都不尽相同，小气候适应性城市广场设计中应注意 2 个关系。

1) 动静关系。广场落成后，周边建筑和内部空间结构在较长时间内呈稳定状态，即广场的 SVF 为静态，而一天的小气候，一年四季的小气候都是在变化的，即广场的关键扇区为动态。在广场设计之初，应考虑适应动态小气候变化特征，提供良好小气候环境。2) 矛盾关系。人们的热偏好是冬季喜阳，夏季喜遮荫，太阳运行的自然规律是夏季太阳高度较大，形成的阴影小，冬季相反。因此，冬暖夏凉的愿望和冬冷夏热的自然规律之间的矛盾关系在设计中应引起注意。

##### 5.2 分区设计

考虑到广场设计中的动静关系和人与自然的矛盾关系，在设计时可以根据环境和热偏好划定小气候设计分区，以长宽均为 100m，宽高比 (D/H) 为 3:1 的广场为例，通过 Ecotect 软件根据冬至日和夏至日的太阳运动轨迹，提出冬夏小气候设计分区的概念模型（图 6）。在冬季，舒适区①是连续 5 小时及以上处于太阳照射的区域，不适区③是全天处于阴影下的区域，其余空间为中立区②；在夏季，舒适区④是 13: 00 后共同的阴影区，不适区⑥是连续 8 小时及以上处于太阳照射的区域，其余空间为⑤中立区。

小气候设计分区可以为广场家具的布置提供参考，如提供观赏、



6 冬夏小气候设计分区  
Microclimate design zoning in summer and winter

休闲类的家具更适合布置在热舒适区内，在不适区内更适合布置提高热舒适度，改善广场小气候的家具。在实际案例中可根据场地周边情况计算分区，统筹考虑冬夏两季的场地小气候，合理布置广场家具，提高广场小气候的适宜性。

### 5.3 家具设计

与固定的周边建筑相比，广场内部的家具，可以直接改变关键扇区  $SVF_{sectors}$ ，属于景观设计师的设计范畴。动态的广场家具设计可以更好地适应人们热偏好与太阳一日或冬夏运行规律间的矛盾关系，改善广场家具在关键扇区或整个广场的遮蔽情况，如设置可调节遮阳帘，在夏季开启，减少场地太阳辐射；在冬季关闭提高场地太阳辐射。目前中国室内大型电动遮阳帘的工艺已十分成熟，在造价允许的情况下可以引入广场设计中，以提高广场的热舒适度。

落叶植物在夏季枝繁叶茂可以遮挡烈日，在冬季枝叶凋敝可以增加太阳直射，是良好的动态调整广场遮蔽太阳辐射的设计元素，但在应用中宜选择冠大荫浓的高大植株，保持冠下通风良好，提高树冠下的人体热舒适度。

除了可以直接阻挡太阳辐射的广场家具，通过喷泉、喷雾的夏季降温作用，景墙、绿篱的夏季引风和冬季阻风作用，铺装材质的吸热、反射特性也可以对城市广场小气候环境形成有效的改善。

## 6 研究展望

在讨论关键扇区对小气候的影响时，从太阳辐射角度出发，所选的扇区均位于太阳视运动轨迹上，而影响风速扇区的高度角通常较低，方位多在夏季主导风向或场地主导风向上。故结论中  $SVF_{sectors}$  对风速的影响较小。若分析扇

区对风速的影响，应考虑不同季节和空间形态的城市主导风向和场地主导风向的影响<sup>[21]</sup>，扇区划分时，可只在方位角上进行分隔，高度角上不做分隔或较少分隔，通过实测和数据模拟相结合的方式分析广场风环境特征，探寻小气候适宜性广场的营造理论、方法和技术。

注释：

图1~6，表1~4为作者自绘。

### 参考文献 (References):

[1] 李晓锋, 张志勤, 林波荣, 等. 围合式住宅小区微气候的实验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003(12): 1638-1641.

[2] LI Xiaofeng, ZHANG Zhiqin, LIN Borong, et al. Experiment on the Outdoor Microclimate within A Residential Building Block with A Partially Enclosed Yard[J]. Journal of Tsinghua University (Sci & Tech), 2003(12):1638-1641.

[3] 刘滨谊, 林俊. 城市滨水带环境小气候与空间断面关系研究: 以上海苏州河滨水带为例[J]. 风景园林, 2015(6): 46-54.

[4] LIU Binyi, LI Jun. Study on the Relationship between Microclimate and Spatial Section of Urban Waterfront: A Case Study of Shanghai Suzhou Riverside[J]. Landscape Architecture, 2015(6):46-54.

[5] Emmanue R, Rosenlund H, Johansson E. Urban Shading - A Design Option for The Tropics A Study in Colombo, Sri Lanka[J]. International Journal of Climatology, 2007, 27(14): 1995-2004.

[6] Akbari H. Shade Trees Reduce Building Energy Use and CO2 Emissions from Power Plants[J]. Environmental Pollution, 2002, 116(Suppl 2): S119-S126.

[7] Shashua-Bar L, Potchter O, Bitan A, et al. Microclimate Modelling of Street Tree Species Effects within the Varied Urban Morphology in the Mediterranean City of Tel Aviv, Israel[J]. International Journal of Climatology, 2009, 30(1): 44-57.

[8] 郑颖生, 史源, 任超, 等. 改善高密度城市区域通风的城市形态优化策略研究: 以香港新界大埔墟为例[J]. 国际城市规划, 2016, 31(5): 68-75.

[9] ZHENG Yingsheng, SHI Yuan, REN Chao, et al. Urban Ventilation Strategies for Micro Climate Improvement in Subtropical High-density Cities: A Case Study of Tai Po Market in Hong Kong[J]. Urban Planning International, 2016, 31(5): 68-75.

[10] Oke T R. Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island: Comparison of Scale Model and Field Observations[J]. International Journal of Climatology, 1981, 1(3): 237-254.

[11] Oke T R. Street Design and Urban Canopy Layer Climate[J]. Energy & Buildings, 1988, 11(1-3):103-113.

[12] Lin T P, Matzarakis A, Hwang R L. Shading Effect on Long-Term Outdoor Thermal Comfort[J]. Building & Environment, 2010, 45(1): 213-221.

[13] Makropoulou M, Gospodini A. Urban Form and Microclimatic Conditions in Urban Open Spaces at The Densely Built Centre of A Greek City[J]. Journal of Sustainable Development, 2006, 9(1):2016, 1-9.

[14] 张顺尧, 陈易. 基于城市微气候测析的建筑外部空间围合度研究: 以上海市大连路总部研发集聚区国歌广场为例[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2016(6): 1-26.

[15] ZHANG Shun Yao, CHEN Yi. Degree of Enclosure as Outdoor Space Form Parameter Study Based on the Urban Microclimate Analysis: A Case Study on Office Building Site Design in Shanghai[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2016(6): 1-26.

[16] 金虹, 崔鹏, 乔梁. 严寒地区广场微气候舒适度与参与人数相关性研究[J]. 建筑科学, 2017, 33(10): 1-7.

[17] JIN Hong, CUI Peng, QIAO Liang. Study on The Correlation Between Microclimate Comfort and The Number of Crowd on Square in Severe Cold Regions[J]. Building Science, 2017(10): 1-7.

[18] 翁笃鸣. 用近似图解法计算遮蔽物对日照条件的影响[J]. 气象, 1979(12): 16-18.

[19] WENG Duming. The Influence of Shelter on Sunshine Condition Based on Approximate Graphic Method. [J]. Meteorological Monthly, 1979(12):16-18.

[20] Mayer H, Hoppe P. Thermal Comfort of Man in Different Urban Environments[J]. Theoretical & Applied Climatology, 1987, 38(1): 43-49.

[21] Soderstrom G F, DuBois E F. The Water Elimination through Skin and Respiratory Passages in Health and Disease[J]. Archives of Internal Medicine, 1917(5PartII): 931-957.

[22] Makaremi N, Salleh E, Jaafar M Z, et al. Thermal Comfort Conditions of Shaded Outdoor Spaces in Hot and Humid Climate of Malaysia[J]. Building and Environment, 2012, 48:7-14.

[23] 张京伟, 张德顺, 刘庆华. 上海从澳大利亚引种园林植物的种源地选择[J]. 中国园林, 2010, 26(7): 83-85.

[24] ZHANG Jingwei, ZHANG Deshun, LIU Qinghua. Screening of Australia Landscape Plant Regions for Shanghai Plant Introduction[J]. Chinese Landscape Architecture, 2010, 26(7): 83-85.

[25] 王振, 张京伟, 张德顺. 基于模糊相似优先比法划分与上海气候相似的全球区域[J]. 中国园林, 2012, 28(1): 91-93.

[26] WANG Zhen, ZHANG Jingwei, ZHANG Deshun. Global Zoning for Landscape Plant Introduction with The Method of Fuzzy Analogy Preferred Ratio to Shanghai[J]. Chinese Landscape Architecture, 2012, 28(1): 91-93.

[27] 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.

[28] ZHANG Deshun, WANG Zhen. Micro-climate Effect and Human Thermal Comfort of Square Canopy in Dense Habitat—A Case Study of Shanghai knowledge and Innovation Community Square[J]. Chinese Landscape Architecture, 2017, 33(4): 18-22.

[29] 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.

[30] LIU Binyi, ZHANG Deshun, ZHANG Lin, et al. Basic Investigation and Research of Microclimate Responsive Landscape Design in Shanghai Urban Open Spaces[J]. Chinese Landscape Architecture, 2014, 30(12): 17-22.

(编辑 / 祖笑艳)