

扬州古典园林空间夏季热环境研究 ——以小盘谷为例

Research on Summer Thermal Environment of Yangzhou Classical Garden Space: A Case Study of Xiaopangu

王 健 郭红霞*
WANG Jian GUO Hongxia*

(扬州大学建筑科学与工程学院, 扬州 225000)
(College of Architectural Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu, China, 225000)

文章编号: 1000-0283(2023)04-0118-07
DOI: 10. 12193/j. laing. 2023. 04. 0118. 015
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2022-08-27
修回日期: 2023-01-26

摘 要

为了挖掘扬州古典园林的生态智慧, 对小盘谷园林空间进行现场测试, 运用热环境评估模型RayMan计算生理等效温度(PET)进行热舒适评价, 分析了空气温度、相对湿度、风速等气候要素在夏季白天的变化规律, 并结合天空视域因子(SVF)探讨了古典园林的空间形态对夏季热环境的影响。结果表明, 扬州古典园林开敞空间因受到更多的太阳辐射, 导致夏季白天炎热且热舒适性较差; 半闭合空间具有较强的空间适应性, 应合理配置园林构成要素改善热环境; 闭合空间因受到较少的太阳辐射, 主要应考虑风环境对热舒适的影响。另外, SVF也是热环境评价的重要指标之一, 但不是精确指标, 天空视域的形态以及方向也对热舒适有较大影响。

关键词

扬州古典园林; 微气候; 热舒适; 天空视域因子

Abstract

To excavate the ecological wisdom of Yangzhou classical gardens through the field test of Xiaopangu garden space and the thermal comfort evaluation by using the thermal environment evaluation model RayMan to calculate the equivalent physiological temperature (PET), this paper analyzes the change rules of air temperature, relative humidity, wind speed and other climatic factors in summer and daytime. It discusses the impact of the spatial form of classical gardens on the summer thermal environment in combination with the sky view factor (SVF). The research shows that the open space of Yangzhou classical gardens is exposed to more solar radiation, resulting in hot summer days and poor thermal comfort. On the other hand, the semi-closed area has strong spatial adaptability, and the elements of gardens should be reasonably allocated to improve the thermal environment. Because the closed space receives less solar radiation, the impact of the wind environment on thermal comfort should be considered. In addition, SVF is also one of the critical indicators of thermal environment evaluation, but it needs to be an accurate indicator. The shape and direction of the sky view also significantly impact thermal comfort.

Keywords

Yangzhou classical garden; microclimate; thermal comfort; sky view factor

王 健

1975年生/男/江苏扬州人/哈尔滨工业大学建筑学院在读博士研究生/讲师、高级建筑师、一级注册建筑师/研究方向为城市有机更新、绿色建筑

郭红霞

1979年生/女/江苏扬州人/博士/讲师、一级注册建筑师/研究方向为环境行为学

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: yz_ghx@126.com

基金项目:
教育部人文社会科学研究基金“基于使用者行为一感知的城市公园建成环境动态评价模型及应用研究”(编号: 21YJJEZH001)

策略,既可以降低健康风险,也可以节约建筑能源,减少二氧化碳的排放^[2-4]。目前中国大部分地区在所有季节有持续变暖的趋势^[5],正因如此,微气候以及热舒适研究就变得更加有现实意义。

在对城市微气候的研究中,诸多学者发现通过优化空间形态、植被、水体等相关要素,可以有效改善城市小气候环境,提高外部空间热舒适,缓解城市热岛效应^[6-9]。在对空间形态的定量分析中,天空视域因子(Sky View Factor, SVF)、街道高宽比(H/W)和街道朝向等通常被用于量化城市几何结构,但因SVF综合了高宽比、建筑密度、植被特征等多种城市下垫面不规则、复合的、三维的空间形态特征,已被广泛用作量化城市立体空间特征对小气候影响的重要指标之一^[10-13]。SVF概念是由Oke首次提出,用于城市热岛的研究,其被表示为平面表面从天空接收(或发射)的辐射与整个半球环境发射(或接收)的辐射的比率^[14]。有研究表明,由于SVF值的大小与到达地面的太阳辐射量密切相关,对地表温度有重要影响,直接影响市民的舒适度,已被用作量化外部空间封闭程度的指标,并且通过改变邻里尺度的SVF可以缓解区域的热应力^[15-17]。另外,城市树木的降温效果也与SVF高度相关,由较高植被覆盖率导致的低SVF可以有效改善生物气象条件^[18-19]。由此可以看出,SVF与室外微气候及热舒适存在高度的关联,并且影响外部空间的利用效率。

中国古典园林集匠人和房屋主人的智慧于一体,其气候适应性方面的营造策略也已有众多论述^[20-22]。扬州古典园林历史悠久,作为江南园林的代表之一,从“杭州以湖山胜,苏州以市肆胜,扬州以园亭胜,三者鼎峙,不分轩轻”^[23]中可见扬州古典园林曾经



图1 小盘谷园林位置图
Fig. 1 Location map of Xiaopang garden

的繁华,至今还保留30余处。扬州小盘谷因其“以少胜多”的造园手法成为了扬州古典园林营造艺术的杰出典范^[24-25],与通常“前宅后园”的造园模式不同,采用了“东园西宅”的格局,东园又以复廊划分东西、沟通南北,别具匠心。文章根据扬州小盘谷园林空间形态的差异,针对外部空间中开敞空间、闭合空间和半闭合空间三种类型所对应的代表性空间,并引入SVF进一步定量评估园林构成要素以及复杂的空间形态对热环境的影响,为当下城市空间有机更新及园林热环境改善提供有益的借鉴。

1 扬州古典园林微气候现场实测

1.1 场地概况

小盘谷位于江苏省扬州市广陵区老城中中心丁家湾大树巷内,坐北朝南,北至丁家湾,东西与民居相连(图1)。扬州市属于亚热带季风性湿润气候向温带季风气候的过渡区,四季分明,日照充足,雨量丰沛,冬季盛行干冷的偏北风,夏季多为湿热的东南到东风。根据扬州统计年鉴气候数据分析表

明,1995年以来年平均气温整体呈偏高趋势;2017-2019年平均气温分别为16.7℃、16.7℃、16.6℃,均高于常年平均气温15.7℃,夏季最高气温分别为40.4℃、37.3℃、38.6℃,均高于常年极端最高气温平均值37.1℃;扬州夏季(6-8月)平均相对湿度为80%左右,夏季平均风速约为2 m/s。就目前热环境状况来看,受气候变暖和城市热岛效应的双重影响,小盘谷所处的扬州老城中心区域正遭受夏季炎热的困扰。

小盘谷由住宅、园林两大部分组成,占地面积约5 700 m²,建筑面积约3 300 m²,系清代光绪三十年(1904年)两江总督周馥购得徐氏旧园重修而成,至今已有110多年的历史,现为全国重点文物保护单位。住宅部分由火巷分隔东、西两轴组合,前后主房原各五进,由厅、廊、楼、室等组合。园林在住宅的东侧,由厅堂、水榭、游廊、六角亭、花墙、水池、假山等构成,被复廊、花墙分隔成东、西两园。小盘谷园林的西园以叠石为主,分为南北两部分;北部“九狮图山”是整个园林最精华的部分,高处掇山,

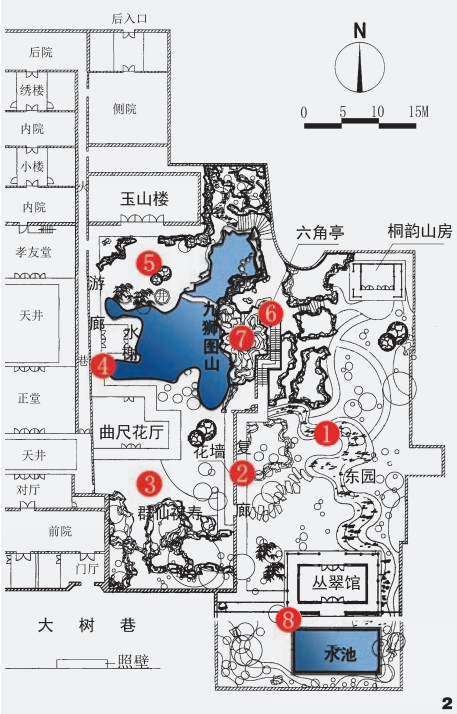


图2 观测点位置图
Fig. 2 Location map of observation points

低处理水，两者高差达9 m，六角亭是全国的制高点。南部“群仙拜寿”以散落置石为主，两者以曲尺花厅分隔，两园的面积比约为2：1；北部空间较开敞，南部空间较为幽闭，曲尺花厅前堆土叠石。东园建筑有北侧的桐韵山房和南侧的丛翠馆，丛翠馆南侧为新修复的方池竹林；南北两侧建筑之间皆为植物，中间穿插砖石铺装的园路，达到“曲径通幽”的效果，增添翳然之趣。

1.2 测试点布置

微气候影响因子主要为风速、空气温度及空气相对湿度，其中空气温度与风速是影响微气候热舒适最关键的两个因素^[26]。微气候研究主要有两种类型：观测法和模拟方法。由于古典园林空间的风速、空气温度及相对湿度跟造园要素以及空间形态有很大

的关系，因此必须针对各种空间类型进行分析，才能深入了解扬州古典园林的微气候特征。本次研究主要采用实地观测法，选点以期能覆盖园林空间的主要类型，在研究范围内主要参考SVF大小按开敞 ($SVF \geq 0.4$)、闭合 ($SVF < 0.05$)、半闭合 ($0.4 > SVF \geq 0.05$) 三种空间类型进行大致分类，并从中选择具有代表性的节点空间，共布置8个测试点(图2)，主要考察建筑、水体、山石、植被等园林要素的组合及空间形态对微气候因子的影响，观测点概况详见表1。

1.3 测试仪器及方法

本次测试时间选择在2020年8月15日至17日7:00-18:00进行，测试日均为晴热，符合夏热冬冷的气候特征。微气候测试仪器及参数如表2所示，测点均距地面垂直1.5 m高

处，每10 min自动记录一次，以3天每小时整点取平均值，绘制逐时变化动态图。SVF测定采用鱼眼摄影法^[27]，本次使用SONYα6400配4 mm F2.8鱼镜头相机在1.1 m高度的固定位置拍摄天空照片，然后将这些图像输入软件RayMan模型，计算出各测试点的SVF。

2 实测结果与分析

2.1 空气温度

根据当地气象局数据，测试期间最高气温37.0℃。从测试点气温测试结果来看(图3)，小盘谷园林部分最高温度出现在下午14:00左右。在所有测点中，位于东园中心位置的开敞空间测点1峰值最高，达到38.8℃，这主要是由于测点1天空比较开阔，并无高大的树木遮阳，白天长时间太阳直接辐射加上下垫面地砖的辐射所致，另外正是由于天

表1 观测点概况
Tab. 1 Overview of observation points

测点 Site	位置 Location	遮阳 Sunshade			通风 Ventilation			水环境 Water		空间类型 Space type			铺地 Pavement	
		建筑	植被	假山	无	半封闭	开阔	近水	远水	开敞	闭合	半闭合	石	砖
1	东园中央				✓		✓		✓	✓				✓
2	复廊	✓				✓			✓			✓	✓	
3	曲尺花厅前		✓			✓			✓			✓		✓
4	游廊	✓				✓		✓			✓		✓	
5	玉山楼前		✓				✓	✓				✓		✓
6	六角亭	✓					✓		✓			✓	✓	
7	假山内			✓		✓		✓			✓		✓	
8	丛翠馆前		✓				✓	✓				✓	✓	

表2 测量仪器及参数
Tab. 2 Measuring instruments and parameters

测试参数 Parameters	测试仪器 Instrument	仪器精度 Accuracy	分辨率 Resolution	测量范围 Measuring range
空气温度	德图 (Testo435-2) 多功能测量仪	±0.3℃	0.1℃	-20~70℃
相对湿度	德图 (Testo435-2) 多功能测量仪	±2% (2%~98%)	0.1%	0~100%
风速	NK5500 (S400) 小型气象站	±3%	0.1 m/s	0.6~40 m/s
风向	NK5500小型气象站	±5°	1°	0~360°
黑球温度	JTR04黑球温度计	±0.5℃	0.1℃	-20~125℃

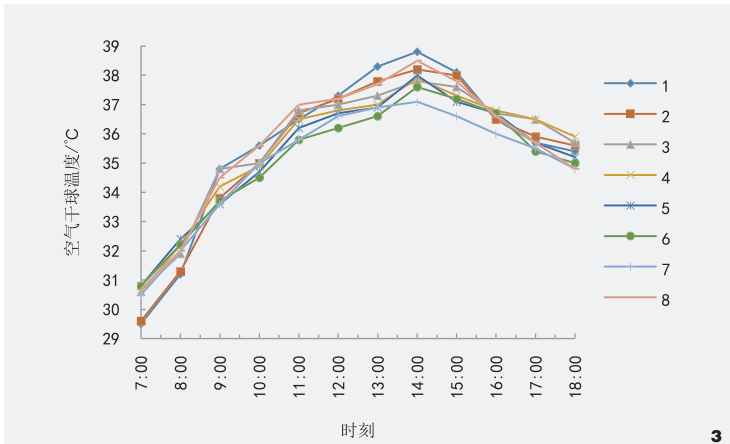


图3 测试点空气温度
Fig. 3 Air temperature of test point

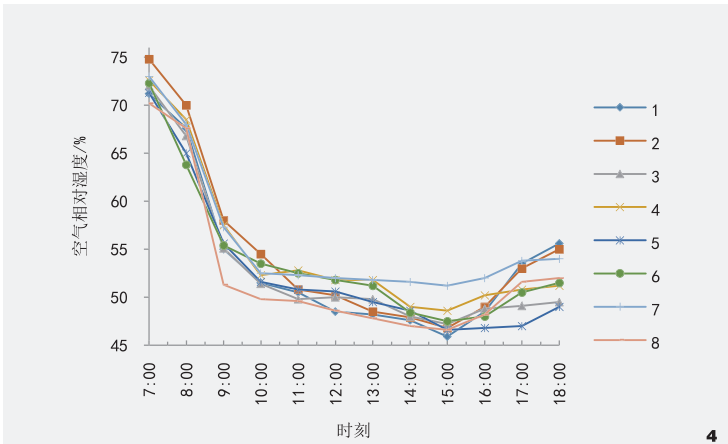


图4 测试点相对湿度
Fig. 4 Relative humidity of test point

空开阔，夜间散热较快，导致早晨温度谷值较低。闭合空间测点7处于假山洞中，厚重的山石遮挡了太阳辐射，且西侧邻水，并有一定的孔洞朝向水面，由于水具有高热容量和低太阳反射率的特点，且水的蒸发使周围大气吸收潜热，对大气温度有较大的影响，正是由于这些因素导致测点7峰值最低，仅为37.1℃，比测点1低1.7℃左右。在对所有测点结果比较中发现，东园温度普遍高于西园，由于西园高大树木遮阳和水体起到了很好的降温效果。在对比其余各测点遮阳对空气温度的影响时发现，外部空间中树木遮阳的降温效果要好于建筑遮阳。

2.2 空气湿度

相对湿度 (RH) 指空气中水汽压与饱和水汽压的百分比，也就是湿空气的绝对湿度与相同温度下可能达到的最大绝对湿度之比。由小盘谷园林外部空间不同测试点的空气相对湿度测试结果可以看出 (图4)：空气相对湿度与气温的变化规律正好相反，白天随着气温的逐步升高，空气的饱和水汽压也

随之增加，因此空气相对湿度逐步降低，最低点相比气温最高点时间上稍微滞后，谷值出现在15:00左右，之后空气相对湿度随着温度的降低又逐步升高。这主要是由于空气的饱和水汽压随着温度的升高而增大，因此出现中午的相对湿度比早晚的要小。在所有测试点中，由于测点1温度峰值最大，因此空气相对湿度谷值最低，为45.9%，而测点7温度峰值最低，因此谷值最高，为51.3%，二者相差5.4%左右。另外，由于水面的蒸发效应，邻水空间的相对湿度也受到了一定的影响。从所测试结果来看，测点4和测点5温度的峰值相同，但测点4临近水面，所测的相对湿度谷值也稍大。

2.3 风速

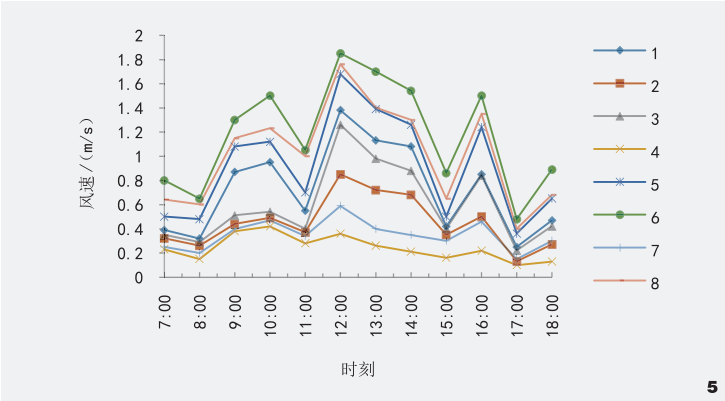
根据当地气象局数据，测试日为南风，风速为2级 (1.6 ~ 3.3 m/s)。从测试结果来看 (图5)，由于受城市下垫面的影响，小盘谷园林部分外部空间各测点的风速峰值均小于2 m/s。由于测试点6位于六角亭，地处全园的最高点，周围遮挡物少，因此在所有测

试点中平均风速最高。测点5和测点8，迎风面比较开阔，对风的遮挡较少，风速也较大。测试点4由于南、西、北三面北建筑物遮挡，在所有测点中平均风速最低。测试点1在所有测试点中，天空最为开阔，但平均风速并不是最高，主要是迎风面有密植的灌木遮挡，影响了风速。测点3迎风面有山石遮挡，导致风速较低。位于复廊的测试点2，由于受复廊的遮挡，且墙上的窗洞位置较高 (高于测点高度)，在一定程度上也影响了风速，导致风速较低。位于假山洞中的测点7，由于山体比较通透，也能获得比较稳定的轻微风。

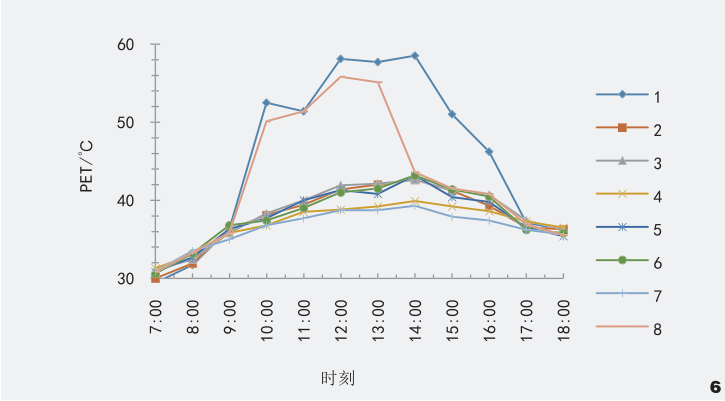
3 扬州古典园林空间形态与热舒适评价

3.1 小盘谷热舒适特征

在室外热舒适的研究中，生理等效温度 (Physiological Equivalent Temperature, PET) 是应用最广泛的模型，在中国的运用比例高达40%左右^[28]。PET建立在慕尼黑能量平衡模型 (MEMI) 的基础上，该模型以生理相关的方式模拟人体的热状态。根据现场实测微气候数据，



5



6



7

图5 测试点风速
Fig. 5 Wind speed at test point
图6 测试点生理等效温度
Fig. 6 Physiological equivalent temperature of test point
图7 测试点1-8现状及天空视域因子
Fig. 7 Status and sky view factor of test points 1-8

并运用德国弗莱堡大学教授安德里亚斯教授 (A. Matzarakis) 及其团队开发的热环境评估模型RayMan模型^[29]得出测量期间的PET变化曲线图。

从计算结果来看 (图6), 早晚各测点PET相差不大, 但在受到太阳辐射时, 数值逐步升高, 尤其受到太阳直射的测点明显高于其

他测点, 由此看出, 夏季白天室外热舒适主要取决于太阳辐射, 尤其是太阳直射对热舒适的影响很大。位于东园中心的测试点1和丛翠馆南侧的8在白天有较长时间连续暴露于太阳直接辐射当中, 导致受到太阳直射时PET明显高于其他各测试点, 峰值最大差值达到15℃左右。由于假山中的测试点7和游廊测

点4很少接受到太阳的直接辐射, 白天的PET变化幅度最小, 峰值也最低, 仅略高于空气温度, 是夏季白天最好的纳凉避暑之处。

3.2 小盘谷空间形态与热舒适关系分析

SVF会直接影响外部空间的太阳辐射强度, 从而影响气温和平均辐射温度 (T_{mrt}), 而气温和平均辐射温度正是影响热舒适的主要因素。从测试数据来看 (图6), 测试点的PET最高点出现在14:00时左右, 此时热舒适状况较差, 并与SVF有密切的关系 (图7)。测试点1位于东园中心, SVF为0.417, 空间较为开敞, 夏季白天的平均辐射温度普遍高于其他测试点, 加上周围浓密的灌木, 风速较低, PET较高, 热舒适较差; 游廊测点4和假山内测点7的SVF均小于0.05, 属于闭合空间, 天空开阔度较小, 受太阳辐射很少, PET普遍较低, 略高于空气温度。由此可以看出, 天空开阔度较小的空间在通风状况良好的情况下, 可以获得较好的舒适度; 其余各测点SVF介于0.05和0.4之间, 属于半闭合空间。测试点5的SVF较高, 但因有高大树木遮阴, PET未见明显升高。曲尺花厅前测点3和丛翠馆南侧测点8的SVF大小较为接近, 测点3南侧有

树木遮阳，但测点8南向遮挡较少，接收到持续的太阳直接辐射较多，导致平均辐射温度相对较高，白天在受到太阳直射时热舒适性较差。复廊测点2和六角亭测点6相比，测点6天空开阔度稍大，尽管测点6处于全国最高处，风速较大，但测点6的生理等效温和测点2相差不大，证明炎热的夏季风对热舒适的影响较小。

在本次研究中发现，SVF与热舒适有一定的关系（图8），但并不是平均辐射温度和热舒适条件的精确指标，外部空间的热舒适不仅仅受SVF大小的影响，天空视域的形态也会影响到平均辐射温度，首先连贯的天空开敞空间会接受到持续的太阳辐射时数，导致平均辐射温度普遍会高于不连贯的天空开敞空间形态。另外，天空视域的方向对热环境的影响也较大，朝南开敞的天空形态会接受到更多的太阳直接辐射，导致平均辐射温度偏高，降低人体热舒适。总而言之，太阳辐射是影响古典园林小气候的重要因素，合理的天空视域形态及方向可以有效提高夏季园林外部空间的热舒适。

4 结论

扬州古典园林是中国江南私家园林的杰出代表，其通过建筑、山石、植被、水池等景观元素创造出了丰富的外部空间形态，而且也营造出了多维度的外部空间热环境。从研究结果来看，园林空间形态对热环境有较大的影响，夏季白天扬州古典园林热舒适的主要影响因素是太阳辐射，尤其是要避免太阳直接辐射。因此，改善园林空间的夏季热舒适，遮阳是主要的方式，不同空间形态的遮阳以及园林构成要素的配置策略也应有所不同。

（1）扬州古典园林多属于住宅园林，由

于受规模、尺度的限制，开敞空间相对较少，主要分布在以植被、花卉观赏为主题的庭院中，这类空间因天空视域比较开阔，因会接受到更多的太阳直接辐射，导致夏季白天炎热且舒适性较差，但开敞空间夜间散热快，早晚比较凉爽，不失为休闲的绝佳之处。开敞空间也应注意周边植被的种植方式，密植的灌木会阻挡风速，因此要考虑种植密度以及对当地主导风向的影响。

（2）半闭合空间是扬州古典园林的主角，空间形态非常丰富，具有多元化的空间适应性，这类空间可以充分利用园林构成要素的合理配置改善空间热环境。如，在以水景为主题的庭院中可以充分利用水的降温、增湿的物理特性，在山石为主题的庭院中应充分利用山石底部避风遮阳，高处迎风纳阳的特性合理安排外部空间。半闭合空间还应结合场地特征，考虑合适的植物种类和种植方式，比如南侧种植高大的落叶乔木，北侧种植常绿灌木，这样可以获得良好的夏季遮阳、冬季增温的效果，提高外部空间热舒适。长廊、景墙、凉亭等构筑物是外部空间中不可或缺的元素，可以通过山洞、门洞、窗洞，隔而不断，使空间互相渗透，又可遮

风、挡雨、遮阳，营造舒适的小气候环境，但也应考虑构筑物的位置、朝向和洞口高度对夏季遮阳及通风的影响。

（3）闭合空间是园林中较为封闭的空间，是园林多样化气候适应性的有益补充。闭合空间主要分布于园林的各个角落以及假山之中，这类空间因夏季获得较少的太阳辐射，因此重点应考虑主导风向对热环境的影响，建议开口方向应朝向南侧，或东南侧，并在开口方向南侧布置水池或植被遮阳，以便获得更加舒适的热环境。

（4）园林设计应结合不同地域、季节、时段的热环境特征组织空间流线，尤其要关注游客在炎热夏季游览时的热舒适。夏季参观动线主要应考虑遮阳为主，可通过连廊、树阴、山洞、凉亭等园林要素串联起各景观节点。另外，人群休息区可以利用水池降温的特点邻水布置，并辅以假山、廊架、高大落叶乔木减少南向太阳直接辐射，提高热舒适。比如，小盘谷南北向的复廊因其提供了二选一的游览路径巧妙地回避了太阳的直接辐射，就具有很好的气候适应性。

（5）SVF可以作为园林空间热环境的重要评价指标之一，合理的天空视域可以获得较

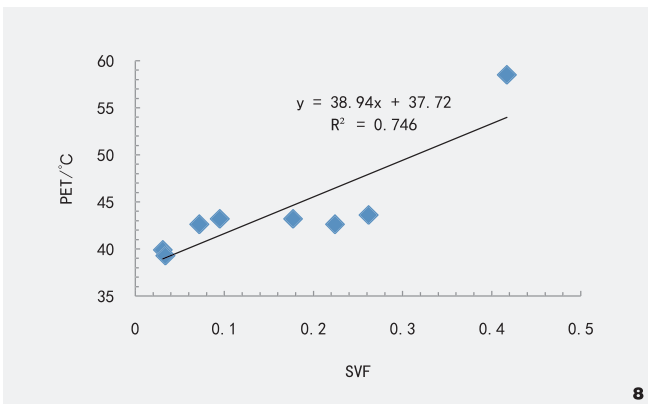


图8 天空视域因子与生理等效温度（14:00）对应关系
Fig. 8 The corresponding relationship between sky view factor and physiological equivalent temperature(14:00)

为舒适的夏季热环境。从研究中发现,夏季白天热舒适的主要影响因素是太阳辐射,尤其是太阳直接辐射。SVF增大虽会增加白天太阳辐射,导致空气温度增高,降低热舒适,但夜间也会加速散热起到降温的效果,因此应综合考虑尽可能减少太阳直射,可见天空位置应尽量朝向北侧开敞,这样白天遮阳效果好,夜晚散热快,可以获得最佳的热环境,同时降低热岛效应。

扬州古典园林是一种独特的院落空间形态,多元化的空间形态满足了不同时间、空间的需求,是园林主人和工匠们在长期的实践中探索出的适应当地气候特征的艺术典范,很值得当代园艺师和建筑师们借鉴。

注:文中图表均由作者自绘。

参考文献

[1] The United Nations: Department of Economic and Social Affairs. 2014 Revision of the World Urbanization Prospects[EB/OL]. [2014-07-10](2023-01-20). <https://www.un.org/zh/node/89734>

[2] SALATA F, GOLASI L, PETITTI D, et al. Relating Microclimate, Human Thermal Comfort and Health During Heat Waves: An Analysis of Heat Island Mitigation Strategies Through a Case Study in an Urban Outdoor Environment[J]. Sustainable Cities and Society, 2017(30): 79-96.

[3] CARDINALI M, PISELLO A L, PISELLI C. Microclimate Mitigation for Enhancing Energy and Environmental Performance of Near Zero Energy Settlements in Italy[J]. Sustainable Cities and Society, 2020(53): 101964.

[4] XIE X X, SAHIN O, LUO Z W, et al. Impact of Neighbourhood-scale Climate Characteristics on Building Heating Demand and Night Ventilation Cooling Potential [J]. Renewable Energy, 2020(150): 943-956.

[5] WU F F, YANG X H, SHEN Z Y. Regional and Seasonal Variations of Outdoor Thermal Comfort in China from 1966 to 2016[J]. Science of the Total Environment, 2019(665): 1003-1016.

[6] 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.

[7] XUE F, GOU Z G, LAU S S Y. Green Open Space in High-dense Asian Cities: Site Configurations, Microclimates and Users'perceptions [J]. Sustainable Cities and Society, 2017(34): 114-125.

[8] 薛思寒, 肖毅强, 王琨. 湿热地区景观要素配置对园林热环境的影响研[J]. 中国园林, 2018, 34(02): 29-33.

[9] 刘爽, 方小山, 吴任之. 庭园空间形态对热环境影响的研究进展与启示[J]. 风景园林, 2022, 29(04): 94-100.

[10] MIAO C P, YU S, HU Y M, et al. Review of Methods Used to Estimate the Sky View Factor in Urban Street Canyons[J]. Building and Environmen, 2020(168): 106497.

[11] CHAFER M, TAN C L, CUREAU R J, et al. Mobile Measurements of Microclimatic Variables Through the Central Area of Singapore: An Analysis from the Pedestrian Perspective[J]. Sustainable Cities and Society, 2022(83): 103986.

[12] TAN Z, LAU K K L, NG E. Planning Strategies for Roadside Tree Planting and Outdoor Comfort Enhancement in Subtropical High-density Urban Areas[J]. Building and Environment, 2017(120): 93-109.

[13] YAN H, WU F, NAN X G, et al. Influence of View Factors on Intra-urban Air Temperature and Thermal Comfort Variability in a Temperate city[J]. Science of the Total Environment, 2022(841): 156721.

[14] OKE T R. Canyon Geometry and The Nocturnal Urban Heat Island: Comparison of Scale Model and Field Observations[J]. Journal of Climatology, 1981(1): 237-254.

[15] LI X J, RATTI C, SEIFERLING I. Quantifying the Shade Provision of Street Trees in Arban Landscape: A Case Study in Boston, USA, Using Google Street View[J]. Landscape and Urban Planning, 2018(169): 81-91.

[16] GUO C, BUCCOLIERI R, GAO Z. Characterizing the Morphology of Real Street Models and Modeling Its Effect on Thermal Environment[J]. Energy and Buildings, 2019(203): 109433.

[17] MIRZAE S, OZGUN O, RUTH M, et al. Neighborhood-scale Sky View Factor Variations with Building Density and Height: A Simulation Approach and Case Study of Boston[J]. Urban Climate, 2018(26): 95-108.

[18] TAN Z, LAU K K L, NG E. Urban Tree Design Approaches for Mitigating Daytime Urban Heat Island Effects in a High-density Urban Environment[J].

Energy and Buildings, 2016(114): 265-274.

[19] JAMEIE, 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.

[20] XIONG Y, ZHANG J P, XU X Y, et al. Strategies for Improving the Microclimate and Thermal Comfort of a Classical Chinese Garden in the Hot-summer and Cold-winter Zone[J]. Energy and Buildings, 2020(215): 109914.

[21] 刘之欣, 赵立华, 方小山. 从遮阳效果浅析余荫山房布局设计的气候适应性[J]. 中国园林, 2017, 33(10): 85-90.

[22] 张德顺, 李宾, 王振, 等. 上海豫园夏季晴天小气候实测研究[J]. 中国园林, 2016, 32(01): 18-22.

[23] 李斗. 扬州画舫录(第一版)[M]. 北京: 中华书局, 1960.

[24] 张青萍, 巫文笑. 苏州园林与扬州园林的差异——以小盘谷为例[J]. 园林, 2018, (03): 8-11.

[25] 陈从周. 园林谈丛[M]. 上海: 上海文化出版社, 1980.

[26] LIU W W, ZHANG Y G, DENG Q H. The Effects of Urban Microclimate on Outdoor Thermal Sensation and Neutral Temperature in Hot-summer and Cold-winter Climate[J]. Energy ang Buildings, 2016(128): 190-197.

[27] LIN T P, TSAI K T, HWANG R L, et al. Quantification of the Effect of Thermal Indices and Sky View Factor on Park Attendance [J]. Landscape and Urban Planning, 2012, 107(2): 137-146.

[28] LI J W, LIU N Y. The Perception, Optimization Strategies and Prospects of Outdoor Thermal Comfort in China: A Review[J]. Building and Environment, 2020(170): 106614.

[29] KUMAR P, SHAMA A. Study on Importance, Procedure, and Scope of Outdoor Thermal Comfort—A Review[J]. Sustainable Cities and Society, 2020(61): 102297.