聊城市东昌湖湿地公园植物空间秋季热舒适*

刘慧娇 张中一 冯国庆 褚蓉蓉 董家鑫 杨仕杰 高祥斌

聊城大学农学与农业工程学院 山东聊城 252000

摘要：为探究植物群落空间特征与小气候因子和人体舒适度间的关系，文章以聊城市东昌湖湿地公园为研究对象，选择覆盖空间（CS）、封闭空间（ES）、半开敞空间（SOS）和开敞空间（OS）进行样地调查和小气候实测，借助 RayMan Pro 3.1 计算秋季生理等效温度（PET）对植物群落空间进行热舒适评价。结果表明：1）不同类型的植物空间温湿度和风速均存在显著差异（$P<0.05$）。2）CS 不存在热不适时段，OS 的热不适时段最长。3）空气温度与 PET 呈线性正相关，相对湿度与 PET 呈线性负相关，风速与 PET 不相关。4）天空可视因子（SVF）对植物空间舒适度影响最大；绿化用地比例（GR）不影响舒适度；围合度通过影响风速间接影响舒适度。研究结果揭示了不同类型植物空间的舒适度状况，建议在公园绿地建设中增加 CS 的种植、适当降低植物空间种植密度等，旨在为营造更加多元且舒适的植物空间提供科学依据。

关键词：植物空间；小气候；热舒适；空间特征；生理等效温度

DOI：10.12169/zgcsly.2023.06.26.0001

Autumn Thermal Comfort of Plant Spaces at Dongchang Lake Wetland Park in Liaocheng City

Liu Huijiao Zhang Zhongyi Feng Guoqing Chu Rongrong Dong Jiaxin
Yang Shijie Gao Xiangbin

(College of Agriculture and Agricultural Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252000, Shandong, China)

Abstract: In order to explore the relationship between the spatial characteristics of plant communities, microclimate factors and human comfort, the paper takes Dongchang Lake Wetland Park in Liaocheng City as the research object to carry out plot investigation and microclimate measurement in the covered space (CS), enclosed space (ES), semi-open space (SOS) and open space (OS), and calculate the physiological equivalent temperature (PET) in autumn using RayMan Pro 3.1 for evaluating the thermal comfort of plant spaces. The results show: 1) There are significant differences in temperature, humidity and wind speed among different types of plant spaces ($P<0.05$); 2) There is no thermal discomfort period in CS, and the thermal discomfort period in OS is the longest; 3) Air temperature is positively correlated with PET, relative humidity is negatively correlated with PET, and wind speed is not correlated with PET; and 4) The comfort of plant spaces is most affected by sky visibility factor (SVF), comfort is not affected by green space ratio (GR), and the degree of enclosure has the indirect impact on the comfort through the wind speed. It is hence suggested that CS should be more created in the establishment of park green space, and scientific evidences should be provided for creating more diverse and comfortable plant spaces.

收稿日期：2023-06-26

* 基金项目：山东省重点研发计划项目（2019GNC21410）；聊城大学科研项目（318011903）；山东省创新创业训练项目（S202210447028）；聊城大学创新创业训练项目（CXCY2022137）；聊城大学风景园林学科建设基金（319462212）

第一作者：刘慧娇（2000-），女，硕士生，研究方向为园林规划与景观设计。E-mail：2419109363@qq.com

通信作者：高祥斌（1973-），男，硕士，副教授，研究方向为园林植物与应用。E-mail：gaoxiangbin@lcu.edu.cn

Keywords: plant space; microclimate; thermal comfort; spatial feature; PET

随着城市户外热环境问题日益严重，高温现象频发。城市公园作为重要的旅游休闲景点，具有人流量大、游人停留时间长的特点，而公园绿地植物能够有效改善热环境，因此对城市公园绿地进行热舒适研究尤为重要。

目前，户外舒适度评价主要分为两类，一类是以人的主观感受作为依据构建经验模型，以湿球黑球温度、平均辐射温度、温湿指数等为代表[1]；另一类是基于人体热平衡进行客观评价的机理模型，以预计平均热感觉（Predictive Mean Vote，PMV）[2]、标准有效温度（Standard Effective Temperature，SET）[3]、通用热气候指数（Universal Thermal Climate Index，UTCI）[4]、生理等效温度（Physiological Equivalent Temperature，PET）[5]等为代表，机理模型综合考虑环境因素与人体热机制，更具科学性[1]。PMV 用于户外热舒适评价时存在较大误差[2]；SET 在不同气候条件下的舒适温度值需要进行调整[3]；UTCI 全面考虑各种因素，具有普适性，但计算复杂[4]；PET 计算简单，具有成熟的热机制基础，已广泛用于国内外不同气候条件热环境评价[5]。Marialena 和 Spyros[5]、席天宇和雷永生[6]、郝又佳等[7]分别在雅典、哈尔滨、成都结合实测与问卷，使用 RayMan 模拟分析实际热感受与环境偏好相关性发现，小气候因子与热舒适水平存在较强的相关性，不同地域的热中性温度存在较大差异。Nabilah 等[8]、张俊杰等[9]、胡海辉等[10]在不同季节对植物群落进行小气候因子实测，使用 RayMan 模拟分析小气候因子和 PET 的相关性发现，温度是影响热舒适最重要的因素。由此发现，国内外使用机理模型进行夏季植物群落热舒适的研究较多，且植物群落有明显改善热舒适的效果。但因所处地区气候差异较大，在夏季炎热、高温持续较长的区域，尽管植物群落能有效改善热舒适，但热舒适时段较短[11-13]，绝大部分时段难达到“适中”热感觉。

为了探寻植物群落在营造最佳热舒适度空间中的作用，排除因温度骤变、温度过高或过低造成的热舒适度不佳的问题，最终筛选出热舒适时段长的植物空间，为人们提供适宜的户外空间。本文以聊城市东昌湖湿地公园为研究对象，特选择气温相对稳定的秋分时段进行小气候因子实测与 RayMan 模拟，对不同类型植物空间小气候和热舒适进行研究，探究不同类型植物空间的热舒适状况，为营造公园植物空间提供设计思路，以打造魅力宜居水城、活力枢纽城市。

1 研究区概况

聊城市位于山东西部，属于温带季风气候区，具有春旱多风，夏热多雨，晚秋易旱，冬季干寒的特点。据聊城市气象局统计，近几年聊城秋季最高温可达 33℃，高温持续时间长。研究区为聊城市东昌府区的东昌湖国家湿地公园南部（36°26′—36°27′N，119°58′—119°59′E），总面积 464.72 hm^2。

2 研究方法

2.1 样地调查

根据 Norman K. Booth[14]划分植物空间的方法，依据植物空间的围合程度，选择覆盖空间（Covering Space，CS）、封闭空间（Enclosed Space，ES）、开敞空间（Open Space，OS）、半开敞空间（Semi-Open Space，SOS）4 种不同类型的空间进行人体热舒适研究。在东昌湖国家湿地公园南部选取 8 个（每个空间类型 2 个）典型植物空间，对样地群落（P1～P8）进行详细调查[15]，拍摄样地照片。选择无植物覆盖的硬质铺装广场（C）作为对照点（CK），研究区域各群落分布情况见图 1。根据样地调查所得植物规格和位置，用 Auto CAD 2014 绘制植物空间平面图，用 Photoshop 2018 绘制植物空间的三维立体图，各群落空间基本情况见表 1。

2.2 指标测定

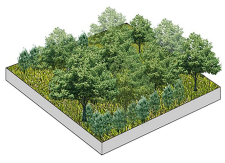
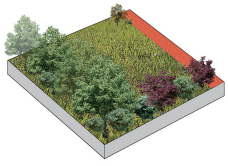
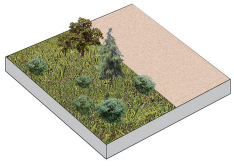
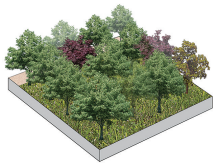
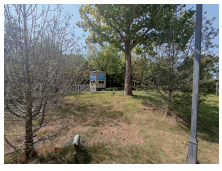
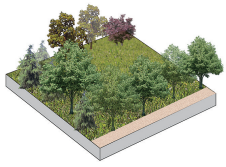
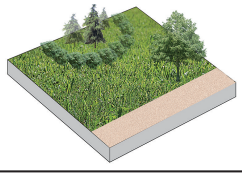
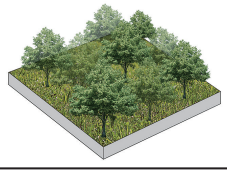
2.2.1 小气候因子

于 2022 年 9 月 22 日、25 日和 26 日共 3 d，选择晴朗无云（少云）且无风（风速≤2 m/s）的天气测定数据。依据样地位置，按照临近距离



图 1　研究区域各群落分布情况（底图引自规划云）

表 1　各群落空间基本情况

群落编号	群落实测照片	群落三维立体图	群落编号	群落实测照片	群落三维立体图
P1（ES）			P2（ES）		
P3（SOS）			P4(OS)		
P5（CS）			P6（SOS）		
P7（OS）			P8（CS）		

（距离<200 m），将样地分 5 组（P1 和 P2；P3 和 P4；P6、P7 和 C；P5；P8），各组样地同时进行小气候因子测定（组内样地依次进行），在 15 min 内测完。在植物群落空间和 CK 内按照五点取样法设置测点，每天 8：00—18：00 进行小气候观测，每 1 h 测定 1 组数据。在各测点距地面1.5 m 处使用热度指数计（AZ8778）测定空气温度和相对湿度，用叶轮风速仪（EXTECH AN100）测定瞬时风速[16]，测定 3 次，取其平均值作为小气候实测值。从哥白尼气候变化服务数据平台下载 ERA5-Land 逐小时太阳辐射数据，导入 ArcGIS 10.8，得到聊城气象站（区站号 54806）所在区域的数据作为研究所需太阳辐射数据。

2.2.2 空间特征指标

按照五点取样法设置测点，使用 WinScanopy pro 2016 冠层分析仪在测点 1.5 m 高度处各拍摄两张植物群落冠层照片，随机选择一张清晰的照片导入冠层分析软件（Gap Light Analyzer，GLA），获得天空可视因子（Sky View Factor，SVF）[17]，表征空间覆盖面；以绿地面积与总面积的比值作为绿化用地比例（Green Ratio，GR）[18]，表征基面；以植物空间内分枝点小于 1.2 m 且株高大于 1.8 m 的中小乔木围成的长度与空间周长的比值作为围合度[19]，表征垂直分隔面。

2.3 热舒适度评价

以 PET 作为植物空间热舒适评价标准，热感觉分级见表 2[10]。PET 在 18～23 ℃时，为“适中”热感觉，被认为最舒适。将 9 种热感觉分为热可接受和热不适状态，“热”“炎热”“冷”“寒冷”属于热不适状态，其他属于热可接受状态[11]。用样方测试日期、时间、纬度、空气温度、相对湿度、瞬时风速、太阳辐射数据建立气象输入文件，用植物类型、坐标位置、高度、树冠半径、树干高度、树干直径以及反照率和反射率建立障碍物文件。将气象输入文件和障碍物文件带入 RayMan Pro 3.1，个人数据、服装和活动设定为软件默认值，输出 PET。

表 2 PET 热感觉分级

PET/℃	≤4	4～8	8～13	13～18	18～23	23～29	29～35	35～41	>41
热感觉	寒冷	冷	凉爽	微凉	适中	微暖	温暖	热	炎热

2.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2016 整理数据，将太阳辐射、PET、SVF 分别运用 ArcGIS 10.8、RayMan Pro 3.1、GLA 进行输出。利用 IBM SPSS 26.0 软件对不同类型植物空间小气候因子的差异性进行单因素方差分析，经 Levene 方差齐性检验，若具有方差齐性则采用 LSD 运算下多重比较的结果，若具有方差不齐性，则选择 Tamhane’s T2 所产生的多重比较结果，显著性水平设置为 $P = 0.05$。采用 Pearson 相关法对植物群落空间特征与小气候因子和人体舒适度进行相关性分析，并使用 Origin 2022 软件做图。

3 结果与分析

3.1 不同类型植物空间小气候差异

对不同类型植物空间各小气候因子进行单因素方差分析，经 Levene 方差齐性检验，空气温度和相对湿度均具有方差齐性，使用 LSD 多重比较法；风速具有方差不齐性，使用 Tamhane’s T2 多重比较法。由表 3 可知，不同类型植物空间各小气候因子间存在显著差异（$P<0.05$）。CK 与 OS、SOS、ES、CS 的日均温度均差异显著（$P<0.05$），其他各类型植物空间日均温度无显著差异。与 CK 相比，OS、SOS、ES、CS 日均温度分别降低 5.09%、9.20%、12.78%、14.84%，各植物空间均有明显的降温效果。CK 与 CS、OS、SOS、ES 的日均湿度均差异显著（$P<0.05$），其他各类型植物空间日均湿度无显著差异。与 CK 相比，CS、OS、SOS、ES 日均湿度分别增加 16.12%、18.93%、22.57%、27.78%，各植物空间均有明显的增湿效果。CK 与 SOS、ES 的日均风速均差异显著（$P<0.05$），ES 与 SOS、CS、OS 的日均风速均差异显著（$P<0.05$），其他各类型植物空间日均风速无显著差异。与 CK 相比，OS、CS、SOS、ES 日均风速分别降低 11.66%、11.83%、26.82%、45.22%。

表 3 不同类型植物空间小气候因子差异性分析

空间类型	群落编号	日均温度/℃	日均湿度/%	日均风速/（m·s^{-1}）
ES	P1、P2	22.671±1.995bc	45.417±5.843a	0.625±0.113c
SOS	P3、P6	23.602±2.494bc	43.565±6.136a	0.835±0.237b
OS	P4、P7	24.668±2.764ab	42.045±5.623a	1.008±0.217ab
CS	P5、P8	22.134±2.678c	41.273±6.520a	1.006±0.216ab
CK	C	25.992±3.222a	35.544±7.228b	1.141±0.156a

注：数据以平均值±标准差（mean±SD）表示；同列不同小写字母表示处理间差异显著（$P<0.05$）。

3.2　人体热舒适度

3.2.1　不同类型植物空间 PET

对不同类型植物空间及 CK 的 PET 整体状况进行对比（图 2）发现，不同类型植物空间 PET 的最小值在 15.5 ℃，最大值在 35～39.6 ℃。CS 的 PET 最大值为 35 ℃，处于“温暖”热感觉，仍为热可接受状态。由于 PET 数据存在极端值，用中位数更能反映植物空间 PET 的中间水平，其中 CS 的 PET 中位数为 27.2 ℃，在不同类型植物空间中最低，其余类型植物空间 PET 中位数基本持平，均小于 CK 的 PET 中位数。

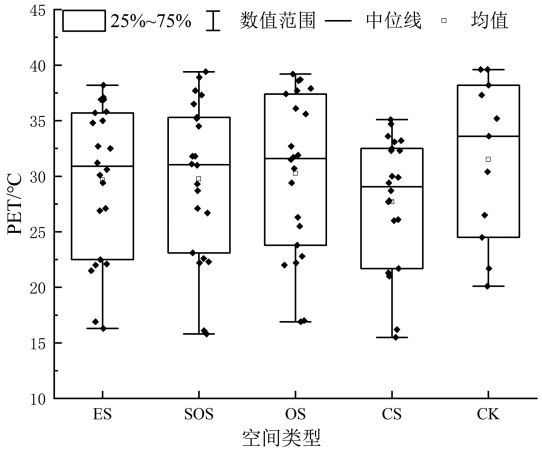


图 2　不同类型植物空间 PET

3.2.2　不同植物空间热感觉

根据表 2 统计不同群落空间各时段热感觉，结果（图 3）表明，各植物空间在 10：00—17：00 时温度较高。其中，C 于 11：00 开始“热”感觉，开始时间最早；P3、P4 和 P7 于 12：00 开始“热”感觉；P6 于 13：00 开始“热”感觉；P5、P8 不存在“热”感觉；各植物空间“热”感觉均于 16：00 结束。植物群落空间 P5 和 P8 不存在热不适状态，其他植物群落空间（P1～P4、P6 和 P7）和 C 的热不适时段分别为 3、3、4、4、3、4、5 h。与 CK 相比，各植物空间均可不同程度提高热可接受时段。

3.3　不同类型植物空间小气侯因子与 PET 相关性

对不同类型植物空间 PET 与各小气候因子进行 Person 相关性分析和线性回归曲线拟合。以不同类型植物空间的小气候因子为 X，以其对应的 PET 为 Y，进行线性拟合，得到不同类型植物空间的小气候因子与 PET 的回归曲线和 R^2（图 4）。

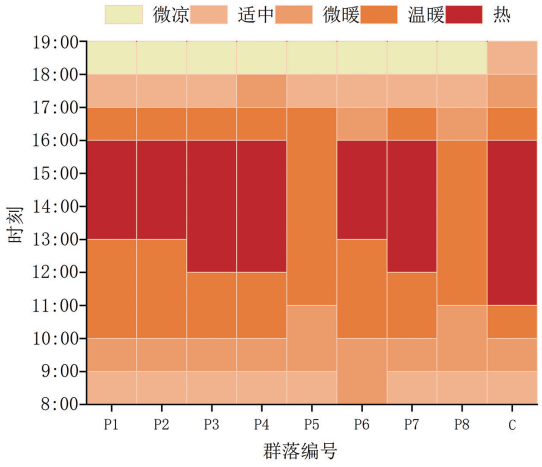


图 3　不同群落空间各时段热感觉分布图

斜率越高，表明随着小气候因子变化，空间的 PET 变化越剧烈。R^2 越大，表明小气候因子与 PET 线性拟合效果越好，相关性越高。

由图 4A 可知，空气温度与 PET 的相关性最高（R^2>0.667），随着空气温度升高，PET 逐渐增大，呈正相关，各回归曲线的斜率排序为：ES>CS>OS>SOS>CK。由图 4B 可知，相对湿度与 PET 的相关性较高（R^2>0.478），随着相对湿度升高，PET 逐渐减小，呈负相关，各回归曲线的斜率排序为：CS>ES>OS>CK>SOS。由图 4C 可知，风速与 PET 不相关（R^2<0.145）。

3.4　植物空间特征与 PET 及小气候因子相关性

对植物空间特征与 PET、小气候因子进行 Person 双变量相关性分析，结果（表 4）表明，不同植物空间 SVF 与日均 PET 呈显著正相关（P<0.05），与日均温度呈极显著正相关（P<0.01），与日均湿度呈显著负相关（P<0.05），与日均风速不相关；不同植物空间 GR 与日均 PET、日均温度、日均湿度和日均风速都不相关；不同植物空间围合度与日均 PET 和日均温度不相关，与日均湿度呈极显著正相关（P<0.01），与日均风速呈极显著负相关（P<0.01）。

4　讨论

4.1　植物空间小气候因子差异性

研究表明，不同类型植物空间的小气候因子间存在显著差异（P<0.05），不同空间的植物遮挡能力不同，OS、SOS 长时间受太阳直射，降温效果不明显，而 CS、ES 能有效阻挡太阳辐射，

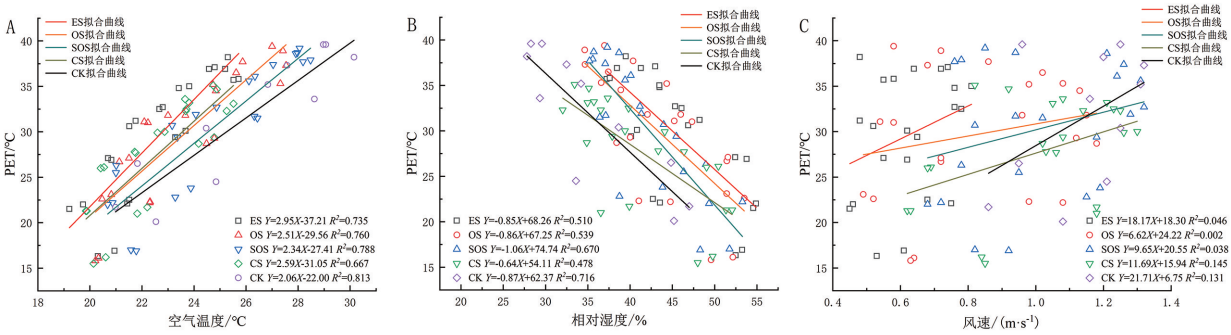


图 4 植物空间 PET 与小气候因子散点图

表 4 植物空间特征与 PET 及小气候因子相关性

群落空间特征	指标	日均 PET	日均温度	日均湿度	日均风速
SVF	Pearson 相关性	0.739*	0.961**	−0.677*	0.404
	显著性（双尾）	0.023	0.000	0.045	0.281
GR	Pearson 相关性	−0.350	−0.590	0.439	−0.461
	显著性（双尾）	0.355	0.094	0.237	0.212
围合度	Pearson 相关性	−0.007	−0.436	0.827**	−0.812**
	显著性（双尾）	0.985	0.240	0.006	0.008

注：** 表示在 0.01 级别（双尾）极显著相关，* 表示在 0.05 级别（双尾）显著相关。

降温效果较明显，这与张明娟等[20]的研究结果一致。各植物空间周边存在大面积水域，因此增湿效果都比较明显，湿度受植物种类、土壤等多种因素的影响，除 ES 增湿效果最明显，其他各类型空间无明显规律。通透的空间有利于空气流通，而相对封闭的空间阻碍空气流动，因此各类型空间降低风速效果不同，这与李佳妮等[21]的研究结果一致。

4.2 植物空间人体热舒适度状况

CS 的 PET 最大值和中位数均低于其他类型空间。OS 热不适时段最长，其次是 SOS 和 ES，CS 不存在热不适时段。CS 能有效遮挡太阳辐射，空气流动带走热量，使 PET 相对较低，热可接受时段更长。OS、SOS 受太阳直射，热量持续积累，热不适时段长。ES 虽有遮荫作用，但围合度高，空气流通不畅，环境闷热，热不适时段较长。以上结果与姜丽娟[11]等人的研究结果一致。

4.3 植物空间小气侯因子对 PET 的影响

PET 受空气温度影响最大，其次是相对湿度，受风速影响很小，这与胡海辉等[10]的研究结果一致。不同类型植物空间小气候与 PET 的相关性结果，与熊瑶[12]等人的研究结果“场地越开阔，小气候因子与 PET 的相关性越高”不同，可能是因为场地临近东昌湖，湿度较大，具有均一性，导致植物空间对湿度的影响较小。

4.4 植物空间优化策略

本研究发现，SVF 对植物空间热舒适度影响最大，GR 不影响热舒适度，围合度通过影响风速，间接影响热舒适度。这与郭晓晖等[22]、姜丽娟等[11]、李佳妮[21]等的研究结果一致。据此，提出植物空间优化策略：一是在公园绿地建设中增加 CS 的种植，以提高秋季植物空间的热舒适度，增加中午时段游人的户外停留时间；二是适当增加植物空间的铺装，方便人群进入；三是可适当降低植物空间种植密度。

5 结论

本文以东昌湖国家湿地公园为研究对象，对 CS、ES、OS、SOS 4 种不同类型的植物空间进行小气候实测和 PET 评价，分析了小气候因子、群落空间特征与 PET 的相关性，得出以下结论：1）不同类型植物空间温湿度和风速存在显著差异（$P<0.05$）；CS 的降温效果最好，ES 的增湿和降低风速效果最好。2）CS 的 PET 最大值和中位数均低于其他类型空间；CS 不存在热不适时段。3）PET 与空气温度呈线性正相关，与相对湿度呈线性负相关，与风速不相关；ES 的 PET 随温度变化最剧烈。4）SVF 与日均 PET 呈显著正相关（$P<$

0.05），与日均温度呈极显著正相关（$P<0.01$），与日均湿度呈显著负相关（$P<0.05$）；GR 与日均 PET、日均温度、日均湿度和日均风速均不相关；围合度与日均湿度呈极显著正相关（$P<0.01$），与日均风速呈极显著负相关（$P<0.01$）。

本研究未使用问卷调查游人实际热感受，后期可通过问卷调查与 Rayman 模拟结合的方式，进一步研究不同空间的人群活动偏好，从而实现公园植物群落空间最大化利用。

参考文献

[1]吴志丰，陈利顶.热舒适度评价与城市热环境研究：现状、特点与展望[J].生态学杂志，2016，35(5)：1364-1371.

[2]ZHANG Y，CHEN H，WANG J，et al.Thermal comfort of people in the hot and humid area of China—impacts of season，climate，and thermal history[J].Indoor Air，2016，26(5)：820-830.

[3]GAGGE A P，FOBELETS A P，BERGLUND L G.Standard predictive index of human response to the thermal environment[J].ASHRAE Transactions，1986，92：709-731.

[4]BRÖDE P，FIALA D，BŁA EJCZYK K，et al.Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI)[J].International Journal of Biometeorology，2012，56(3)：481-494.

[5]NIKOLOPOULOU M，LYKOUDIS S.Use of outdoor spaces and microclimate in a Mediterranean urban area[J].Building and Environment，2007，42(10)：3691-3707.

[6]席天宇，雷永生.严寒地区城市公园人群冬夏两季热舒适差异性研究[J].建筑科学，2021，37(6)：52-60.

[7]郝又佳，陈岚，谭林，等.基于局地气候分区的成都街道空间冬季热舒适研究[J].中国城市林业，2023，21(1)：27-36.

[8]NABILAH A，HAKIM L N，FAWZY M C，et al.Outdoor thermal comfort：application of rayman tools[J].IOP Conference Series：Earth and Environmental Science，2021，738(1)：012008.

[9]张俊杰，柳俊吉，艾乔，等.重庆市滨江公园与桥下公园夏季热舒适度对比测析[J].西南大学学报(自然科学版)，2022，44(12)：197-209.

[10]胡海辉，刘帅，张思琪.城市公园植物群落小气候效应及人体热舒适度：以哈尔滨三座公园为例[J].科学技术与工程，2021，21(23)：10021-10028.

[11]姜丽娟，成雅田，程维金，等.广场绿化形式及其植物景观特征的热环境效应实测分析[J].建筑科学，2022，38(6)：52-58，110.

[12]熊瑶，严妍.江南历史街区中小气候因子与热舒适性关联性研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版)，2021，53(2)：239-246.

[13]黄海静，魏林颖.湿热地区老年人公园热舒适的环境因素[J].中国城市林业，2023，21(1)：13-19.

[14]Booth N K.风景园林设计要素[M].曹礼昆，曹德鲲，译.北京：中国林业出版社，1989.

[15]杨岑，彭尽晖，胡茜雅.植物群落调节微气候舒适度能力及其影响因子：以湖南省怀化市公园绿地为例[J].中南林业科技大学学报，2022，42(12)：183-191.

[16]杨英书，胡希军，金晓玲，等.三维绿量空间分布对植物群落夏季降温增湿效果的影响：以怀化市公园绿地为例[J].湖南农业大学学报(自然科学版)，2022，48(2)：181-189.

[17]祁有祥，骆汉，赵廷宁.基于鱼眼镜头的林冠郁闭度简易测量方法[J].北京林业大学学报，2009，31(6)：60-66.

[18]CHEUNG P K，JIM C Y.Effects of urban andlandscape elements on air temperature in a high-density subtropical city[J].Building and Environment，2019，164：106362.

[19]周娴，靳思佳，车生泉.城市公园植物群落空间特征与私密度关系研究：以杭州为例[J].中国园林，2012，28(5)：99-103.

[20]张明娟，卫笑，苏晓蕾，等.南京市不同结构植物群落在冬夏两季的微气候调节作用[J].生态学杂志，2019，38(1)：27-34.

[21]李佳妮，朱丹莉，王娜，等.城市绿道植物群落空间人体热舒适度研究：以北京三山五园绿道为例[J].北京建筑大学学报，2022，38(6)：39-47.

[22]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.