小学教学楼庭院空间构成要素对儿童热舒适的影响*

毛媛媛 叶 云 谢俊民

苏州大学建筑学院 江苏苏州 215123

摘要：为探究儿童热舒适度与户外空间构成要素之间的相关性，对苏州姑苏区与工业园区内的 95 个小学教学楼庭院空间进行微气候数据采集、空间构成要素量化测量以及对儿童进行问卷调查，结果表明：1）苏州夏季、春季、冬季小学教学楼庭院的儿童热舒适度范围分别为 26.5～34.2 ℃、18.5～26.3 ℃、23.1～28.2 ℃；2）与儿童热舒适度 PET 值显著相关的空间构成要素有 5 个，即绿地配置形式（“贴边+中央”型最佳）、朝向（东西朝向最佳）、围合度（4 面围合最佳）、植物种植类型（乔灌草复合搭配最佳）、绿地率（30%～50%最佳）。基于研究结果，建议通过综合考虑景观特征、优化植物品种、完善辅助设施等手段提升小学教学楼庭院空间的热舒适度。

关键词：儿童；热舒适；构成要素；小学；苏州

DOI：10.12169/zgcsly.2023.07.25.0003

Influence of Constituent Elements of Courtyard Space in Primary School on Children's Thermal Comfort

Mao Yuanyuan Ye Yun Xie Junmin

(School of Architecture, Soochow University, Suzhou 215123, Jiangsu, China)

Abstract: In order to explore the correlation between children's thermal comfort and the constituent elements of outdoor spaces, the study collects the microclimate data and quantitatively measures the space constituent elements at the courtyard spaces of 95 primary schools in Suzhou's Gusu District and Industrial Park, and conducts the questionnaire survey among children. The study finds: 1) The children thermal comfort degree (PET) falls in the range of 26.5-34.2 ℃ in summer, 18.5-26.3 ℃ in spring and 23.1-28.2 ℃ in winter at the courtyard spaces; and 2) There are five space constituent elements which are significantly correlated with the PET value of children's thermal comfort, including green space layout featured with edge + central planting, an east-west orientation, enclosure of courtyards on all four sides, plant configuration with arbors and shrubs, and a green coverage ratio ranging at 30% - 50%. It is suggested that the thermal comfort of courtyard spaces at primary schools could be improved through comprehensive consideration of landscape features, optimization of plant varieties, and improvement of auxiliary facilities.

Keywords: children; thermal comfort; constituent element; primary school; Suzhou

随着儿童友好城市建设的推进，儿童户外活动空间的建设更加受重视[1]。研究户外热环境下儿童的舒适性非常必要。一方面，我国多地持续高温，范围广、时间长，严重影响儿童身心健康[2-3]；另一方面，由于儿童的体表面积与体重的比值较高[4]、代谢率也较高[5]，如果按照成人

收稿日期：2023-07-25

* 基金项目：国家自然科学基金面上项目（41971211）

第一作者：毛媛媛（1974-），女，博士，副教授，研究方向为城市规划。E-mail：maoyuanyuan@suda.edu.cn

通信作者：谢俊民（1976-），男，博士，副教授，研究方向为微气候。E-mail：chunming@cityu.edu.mo

的热需求设计儿童活动场地，易导致儿童热不适[6]。

“热感觉”是人体对周围环境“冷”“热”的主观描述，“热舒适”则是指人体处于对周围环境既不感到“冷”也不感到“热”的舒适状态[7]，通常将“微凉到微暖”的主观反应区称为热舒适区[8]。为了改善户外的人体热感觉，已有研究主要采用问卷调查法、指标评价法进行探究。最初的研究以问卷法为主，并以李克特量表为依据，将热感觉分为 7 个等级，通过人的主观投票得到对应的评价值，操作方便且统筹各种影响因素[9]。随着研究的深入，逐渐采用问卷调查结合指标评价的方法，统筹考虑微气候客观因素与人体热平衡原理[10]。

国外对户外儿童热感觉的研究主要涉及儿童热感觉的作用原理、影响要素及改善策略。国内研究则主要涉及基于植物、水体、铺地等景观构成要素视角[11-12]的儿童热感觉优化策略。这些优化策略虽然在一定程度上对我国儿童的热感觉改善具有指导意义，但需要进一步量化儿童热舒适状态下的景观构成要素参数值。

针对户外热舒适优化策略的定量研究主要涉及空间构成要素和空间形态要素两个方面。起初的研究多基于空间构成要素视角，从植物、水体、铺地等要素进行探究，改善策略主要涉及植被的面积、种类、种植结构；水体的面积、形状、位置、分布；铺装的反射率等[13-16]。随着研究的不断深入，建筑层数、建筑围合面数、空间的朝向等空间形态要素也被引入优化策略的量化探究[17]。以往研究主要基于街道、商业广场、公园、居住区等多种空间类型，得到影响热感觉的景观构成要素主要为空间的朝向、绿化率等[18]。而针对小学教学楼庭院等儿童群体高频活动的空间类型，影响热感觉的景观构成要素是否与街道、商业广场等其他空间类型保持一致，还有待进一步探究与补充。

以往热舒适研究的评价指标主要涉及经验指标和肌理指标，其中肌理指标将微气候参数与人体热量平衡原理统筹考虑，更能精准反映热舒适状况。常见的适用于四季评价的肌理指标主要为预测平均投票数（Predicted Mean Vote，PMV）、生理等效温度指数（Physiological Equivalent Temperature，PET）、环球热气候指数（Universal Thermal Climate Index，UTCI），其中 PET 指标更适合用于儿童热舒适的评价[19]。PET 可专门用于室外热环境舒适程度评价，不依赖于主观评价结果，理论上可以对户外环境热状况做出更准确评价。同时，PET 的单位为℃，这是人们日常评价冷热状况最常用单位，易于理解和接受，且可以进行各种气候类型区的评价工作[20]。

本研究以小学生及其活动的教学楼庭院空间为研究对象，通过实地测量与问卷调查的方式获取数据，经过数据整理和分析，明确与儿童热舒适显著相关的景观构成要素及其对应的参数范围。

1　研究方法

研究选取具有代表性的 4 个测点进行微气候实测，并发放热舒适问卷。首先运用斯皮尔曼相关分析，明确与儿童热舒适相关的空间构成要素；再运用方差分析，明确有利于儿童热舒适的空间构成要素参数值。

1.1　测点选取

研究区以苏州姑苏区与工业园区内的小学教学楼庭院为范围，研究对象为教学楼庭院的空间构成要素。苏州姑苏区与工业园区内的小学教学楼庭院具有热岛效应显著、儿童活动频率高的特征，其对儿童热舒适的研究具有典型性和代表性。据统计，苏州姑苏区和工业园区共有 95 个小学教学楼庭院，通过学校官网等平台公布的数据分别获取 95 个小学教学楼庭院的 7 个构成要素基本信息，即小学教学楼庭院的面积、围合面、建筑层数、绿地率、朝向、植物配置类型、绿地配置形式。

Z 分数是以标准差为单位来表示的一个值对平均数的距离的值。公式如下：

$$Z = \frac{(X - X_0)}{S} \tag{1}$$

式（1）中：X 为原始分数；X_0 为平均数；S 是标准差。Z 分数既从大小顺序，又从彼此间的距离两个方面来说明一个数值的相对地位。因此，为了筛选出能够代表 7 个空间构成要素的典型，以选取的测点能覆盖 7 个构成要素 Z 分数的“较

大值”“平均值”“较小值”为依据，最终筛选出4个测点，即工业园区外国语小学的教学楼庭院（测点1）、星澄小学的教学楼庭院（测点2）、姑胥小学的教学楼庭院（测点3）、沧浪新城第二实验小学的教学楼庭院（测点4）。后续研究中微气候数据测量以及儿童热舒适问卷发放均在4个测点处进行（表1）。

表1 4个测点的空间构成要素概况

空间构成要素	测点1	测点2	测点3	测点4
面积/m^2	1 300	800	200	800
围合面/面	3	4	3	3
建筑层数/层	4	4	3	3
绿地率/%	20	10	30	50
朝向	南北	东西	东西	东西
植物种植类型	乔灌	乔木	乔灌	乔灌草
绿地配置形式	贴边、中央	贴边	中央	贴边、中央

1.2 数据获取

于2022年12月18日、2023年4月17日、2023年6月26日的11：00—13：00在4个测点处进行儿童热舒适问卷的发放。2022年12月18日的最低气温均不足5 ℃，属于冬季典型寒冷日；2023年6月26日最高气温高于35 ℃，属于小学生在校期间的夏季典型高温日；2023年4月17日日均温18 ℃，属于春季典型日。每个测点每个调研日发放60份问卷，3个调研日共获得720份问卷，夏季、春季、冬季各240份。

为了获取儿童的热舒适评价指标值PET和儿童热感觉投票值TSV，将问卷设计为两部分：儿童基本信息和儿童热舒适信息。儿童基本信息包括身高、体重、性别、年龄；儿童热舒适信息包括儿童的服装热阻、新陈代谢、热感觉投票。问卷调查时进行所在空间微气候参数的同步测量，微气候参数包括空气温度、湿度、风速、平均辐射温度、大气压强。各测量设备的测量范围和精度如表2所示，各参数均在离地面1.1 m处（模拟儿童重心所在的高度）被测量。

表2 测量设备的测量范围和精度

微气候参数	仪器名称	测量参数及范围
温度	DELIXI 温湿度计	−30~60 ℃
湿度	DELIXI 温湿度计	0~99%
风速	CHNT ZTW 1801B 风速仪	0~30 $m \cdot s^{-1}$
大气压强	BAROMRTER 气压表	973~1 053 hPa
黑球温度	AZ87786 黑球力测量计	0~80 ℃

1.3 数据处理

PET的计算以二节点模型为基础，将人体分为皮肤层和核心层，皮肤层通过汗液蒸发等进行热传递，核心层通过产热冷战等进行热传递[21]。若两个热环境中的人体核心层温度和平均皮肤温度分别对应相等，则热环境等价。标准环境下空气温度等于平均辐射温度，相对湿度为50%，人体身着标准服装，在标准代谢率下，与实际环境产生相同的平均皮肤温度T_{sk}和皮肤湿润度w，则标准环境的温度为PET[22]。

2 结果与分析

2.1 测点的空间使用情况

根据分析结果，1~6年级被试儿童所处年级分别占17%、21%、12%、18%、17%、15%，说明被试儿童的年级比例分布较为均衡；处于坐着、站着、走路、慢跑、快跑、玩耍状态的被试儿童分别占10%、15%、12%、20%、13%、30%，说明被试儿童以处于慢跑和玩耍状态的人数居多。

2.2 热舒适的范围计算

将夏季、春季、冬季教学楼庭院处的热感觉投票值TSV与对应生成的PET值进行回归分析得到表达式（2）~（4），当TSV处于−0.5~0.5时，表明儿童处于热舒适状态。计算得到夏季、春季、冬季能使儿童处于热舒适的PET范围分别为26.5 ~ 34.2 ℃、18.5 ~ 26.3 ℃、23.1 ~ 28.2 ℃。

$$TSV（夏季）= -0.126 \cdot PET^2 + 1.172 \cdot PET - 24.124 \quad (R^2 = 0.86) \tag{2}$$

$$TSV（春季）= 0.021 \cdot PET^2 - 0.749 \cdot PET + 5.09 \quad (R^2 = 0.62) \tag{3}$$

$$TSV（冬季）= 0.004 \cdot PET^2 + 0.008 \cdot PET - 3.044 \quad (R^2 = 0.64) \tag{4}$$

2.3 与热舒适相关的空间构成要素

将教学楼庭院测点处测得的7个空间构成要素（朝向、面积、围合数、建筑层数、植物种植类型、绿地率、绿地配置形式）参数值与儿童热舒适度PET值进行斯皮尔曼指数相关分析，结果（表3）发现，朝向、围合数、植物种植类型、绿地率、绿地配置形式5个要素与儿童热舒适相关。

表 3　PET 值与不同季节教学楼庭院空间构成要素值的斯皮尔曼相关性

项目	朝向	面积	围合数	建筑层数	植物种植类型	绿地率	绿地配置形式
相关系数	0.414*	0.087	−0.289*	0.246	−0.285*	−0.275*	−0.882*
显著性	0.008	0.475	0.017	0.082	0.038	0.004	0.012

注：* 表示在 0.05 级别（双尾）相关性显著，下同。

2.4　空间构成要素的量化

2.4.1　使儿童处于热舒适的绿地配置形式

不同绿地配置形式的热舒适值存在显著差异（表 4），绿地配置形式为“贴边+中央”“贴边”“中央”3 种。通过问卷调查分析结果可知，春季，“贴边+中央”的儿童热舒适人数占比为 30.6%，而“贴边”“中央”的儿童热舒适人数占比分别为 27.8%、26.7%；夏季，“贴边+中央”的儿童热舒适人数占比为 18.9%，而“贴边”“中央”的儿童热舒适人数占比分别为 17.8%、7.2%；冬季，“贴边+中央”的儿童热舒适人数占比为 13.3%，而“贴边”“中央”的儿童热舒适人数占比分别为 7.2%、11.1%。因此，“贴边+中央”的绿地配置形式利于儿童处于热舒适状态。

表 4　儿童热舒适与教学楼庭院绿地配置形式的方差分析对比

绿地配置形式	PET 值（平均值±标准差）			显著性
	春季	夏季	冬季	
贴边+中央	20.2±3.3	37.5±2.8	15.5±2.8	0.012*
中央	20.5±1.5	39.5±0.8	16.2±1.5	0.022*
贴边	19.5±1.7	41.2±1.9	17.4±2.5	0.000*

2.4.2　使儿童处于热舒适的朝向

不同朝向的热舒适值存在显著差异（表 5），朝向有“东西”“南北”两种。通过问卷调查分析结果可知，春季，“东西”朝向的儿童热舒适人数占比为 34.4%，而“南北”朝向的儿童热舒适人数占比为 22.2%；夏季，“东西”朝向的儿童热舒适人数占比为 15.6%，而“南北”朝向的儿童热舒适人数占比为 12.2%；冬季，“东西”朝向的儿童热舒适人数占比为 11.7%，而“南北”朝向的儿童热舒适人数占比为 10.0%。因此，“东西”朝向的教学楼庭院利于儿童处于热舒适状态。

表 5　儿童热舒适与教学楼庭院朝向的方差分析对比

朝向	PET 值（平均值±标准差）			显著性
	春季	夏季	冬季	
东西	21.2±1.5	33.7±1.2	15.7±4.1	0.009*
南北	24.1±1.7	35.5±1.1	18.5±4.2	0.013*

2.4.3　使儿童处于热舒适的围合数

不同围合数的热舒适值存在显著差异（表 6），围合数有“4 面”“3 面”2 种。分析问卷调查结果可知，春季，“4 面”围合的儿童热舒适人数占比为 22.2%，“3 面”围合的儿童热舒适人数占比为 19.6%；夏季，“4 面”围合的儿童热舒适人数占比为 17.8%，“3 面”围合的儿童热舒适人数占比为 15.4%；冬季，“4 面”围合的儿童热舒适人数占比为 22.2%，“3 面”围合的儿童热舒适人数占比为 20.7%。因此，“4 面”围合的教学楼庭院利于儿童处于热舒适状态。

表 6　儿童热舒适与教学楼庭院围合数的方差分析对比

围合数	PET 值（平均值±标准差）			显著性
	春季	夏季	冬季	
3 面	23.2±1.8	35.7±4.7	18.7±3.2	0.000*
4 面	25.1±1.8	35.5±5.1	18.5±4.1	0.005*

2.4.4　使儿童处于热舒适的植物种植类型

不同植物种植类型的热舒适值均存在显著差异（表 7），植物种植形式为“乔灌草”“乔灌”“乔木”3 种类型。通过问卷调查分析结果可知，春季，“乔灌草”类型的儿童热舒适人数占比 22.2%，而“乔灌”“乔木”类型的儿童热舒适人数占比分别为 19.7%、19.4%；夏季，“乔灌草”类型的儿童热舒适人数占比为 19.4%，而“乔灌”“乔木”类型的儿童热舒适人数分别占比为 16.7%、17.8%；冬季，“乔灌草”类型的儿童热舒适人数占比为 21.1%，而“乔灌”“乔木”类型的儿童热舒适人数占比分别为 18.1%、20.6%。因此，植物种植类型为“乔灌草”的教

学楼庭院利于儿童处于热舒适状态。

表 7 儿童热舒适与教学楼庭院植物种植类型的方差分析对比

植物种植类型	PET 值（平均值±标准差）			显著性
	春季	夏季	冬季	
乔木	23.2±2.7	35.7±1.2	18.7±1.8	0.017*
乔灌	22.2±1.5	31.7±0.8	17.7±2.2	0.000*
乔灌草	25.1±2.8	32.5±1.0	20.5±4.9	0.025*

2.4.5 使儿童处于热舒适的绿地率

不同绿地率的热舒适值均存在显著差异（表 8），绿地率分为 50%、30%、20%、10% 4 种。分析问卷调查结果可知，春季，绿地率为 30% 的儿童热舒适人数占比为 34.4%，而绿地率为 50%、20%、10% 的儿童热舒适人数占比分别为 27.8%、25.0%、20.6%；夏季，绿地率为 30% 的儿童热舒适人数占比为 22.2%，而绿地率为 50%、20%、10% 的儿童热舒适人数占比分别为 13.9%、12.2%、10.6%；冬季，绿地率为 50% 的儿童热舒适人数占比为 28.6%，而绿地率为 30%、20%、10% 的儿童热舒适人数占比分别为 25.5%、23.0%、21.1%。因此，绿地率为 30% 和 50% 的教学楼庭院利于儿童处于热舒适状态。

表 8 儿童热舒适与教学楼庭院绿地率的方差分析对比

绿地率/%	PET 值（平均值±标准差）			显著性
	春季	夏季	冬季	
10	23.7±2.1	38.7±1.7	15.5±1.9	0.000*
20	24.2±2.8	37.4±2.5	16.7±3.6	0.005*
30	25.2±3.6	36.8±1.9	14.7±2.1	0.007*
50	21.2±2.8	38.2±3.4	13.7±3.8	0.000*

3 讨论

根据公式（2）~（4）得到夏季、春季、冬季使儿童处于热舒适状态的 PET 范围并不相同，分别为 26.5~34.2 ℃、18.5~26.3 ℃、23.1~28.2 ℃。究其原因，苏州四季微气候差异显著[23]，因此需要尽可能营造使儿童处于四季均热舒适的空间。与其他地域教学楼庭院处于热舒适的 PET 范围比较发现，苏州小学教学楼庭院处于热舒适 PET 范围区间比哈尔滨等北方城市要较小[24]，意味着苏州的儿童对热舒适的敏感程度比北方儿童更高。江苏其他儿童户外活动空间处于热舒适的 PET 范围比较发现，苏州整体范围区间基本一致[25]，意味着同一微气候背景下能使儿童处于热舒适状态的 PET 范围相对一致。

本研究得出的与儿童热舒适显著相关的空间构成要素表明，绿地配置形式、朝向、围合数、植物种植类型、绿地率与儿童热舒适显著相关，意味着在营造苏州儿童户外活动空间时需要优先考虑这些要素。与其他地域对儿童热舒适产生显著影响的空间构成要素比较，发现黑龙江等北方地区对儿童热舒适产生显著影响的空间构成要素多为绿地率、围合面数[26]，而广州、四川等季风地区对儿童热舒适产生显著影响的空间构成要素多为绿地配置形式、朝向、植物种植形式[27]，这与苏州对儿童热舒适产生显著影响的空间构成要素相对一致，这也说明不同地域背景对儿童热舒适产生显著影响的空间构成要素不同。

根据本研究得出的能使儿童处于热舒适状态的空间构成要素参数值，当绿地配置形式为“贴边+中央”型、朝向为东西、教学楼为 4 面围合、植物种植形式为乔灌草复合搭配、绿地率为 30%~50%时，更能满足苏州儿童的热舒适需求，这一结果是由于不同空间构成要素对微气候的影响机制不同。对于绿地率的优化参数范围 30%~50% 而言，与王庆等[28]研究提出的“并不是绿地率越高，人体就越舒适”的结论相一致；对于“东西朝向更能使儿童处于热舒适状态”的发现，与冷红和马彦红[29]提出的“南北朝向的空间形态更能使儿童处于热舒适状态”的结论不一致，这是因为南北方太阳辐射量、风速等不同影响了空间朝向对于儿童热舒适的作用。“教学楼 4 面围合时儿童更容易处于热舒适状态”的结果是对儿童热舒适需求的空间构成要素的补充与完善，这一发现在其他地区是否使用还有待进一步验证。

本研究仅针对苏州小学生，其研究结果对于学龄前儿童和初高中生是否适用还有待探究。此外，除了教学楼庭院空间外，入口广场、风雨操场等也是儿童校园户外活动的重要空间，未来将扩大研究对象的规模和范围，进一步完善不同空间类型的构成要素对不同年龄段儿童的影响，以期为儿童友好空间的建设提供借鉴。

4　结论

小学教学楼庭院空间构成要素中的绿地配置形式、朝向、围合数、植物种植类型、绿地率与儿童热舒适显著相关。当绿地配置形式为“贴边+中央”型、朝向为东西、教学楼为 4 面围合、植物种植形式为乔灌草复合搭配、绿地率为 30%~50%时，更能满足苏州儿童的热舒适需求。建议通过综合考虑景观特征、优化植物品种、完善辅助设施等手段提升小学教学楼庭院空间的热舒适度。

参考文献

[1]李思芸,杨李宁,王勇.儿童热舒适研究现状及展望[J].制冷与空调(四川),2015,29(5):574-580,587.

[2]CHEN L,NG E.Outdoor thermal comfort and outdoor activities:a review of research in the past decade[J].Cities,2012,29(2):118-125.

[3]HARLAN S L,BRAZEL A J,PRASHAD L,et al.Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress[J].Social Science & Medicine,2006,63(11):2847-2863.

[4]YUN H,NAM I,KIM J,et al.A field study of thermal comfort for kindergarten children in Korea:an assessment of existing models and preferences of children[J].Building and Environment,2014,75:182-189.

[5]FALK B,BAR-OR O,CALVERT R,et al.Sweat gland response to exercise in the heat among pre-,mid-,and late-pubertal boys[J].Medicine and Science in Sports and Exercise,1992,24(3):313-319.

[6]TELI D,JENTSCH M F,JAMES P A B.Naturally ventilated classrooms:anassessment of existing comfort models for predicting the thermal sensation and preference of primary school children[J].Energy and Buildings,2012,53:166-182.

[7]赵荣义.关于“热舒适”的讨论[J].暖通空调,2000,30(3):25-26.

[8]GAGGE A.Introduction to thermal comfort[J].Energy and Buildings,1977,35(2):11-25.

[9]BORGERS N,DE LEEUW E,HOX J.Children as respondents in survey research:cognitive development and response quality 1[J].Bulletin of Sociological Methodology,2000,66:60-75.

[10]TER MORS S,HENSEN J L M,LOOMANS M G L C,et al.Adaptive thermal comfort in primary school classrooms:Creating and validating PMV-based comfort charts[J].Building and Environment,2011,46(12):2454-2461.

[11]贺进.幼儿园热环境测试与幼儿热舒适研究[D].重庆:重庆大学,2016.

[12]李思芸.夏热冬冷地区典型城市幼儿热舒适分析研究[D].重庆:重庆大学,2016.

[13]刘学全,唐万鹏,周志翔,等.宜昌市城区不同绿地类型环境效应[J].东北林业大学学报,2004,32(5):53-54,83.

[14]骆心仪,赵阳,郭曈烨,等.基于热舒适的湿热地区露营地树木种植配置模式[J].中国城市林业,2023,21(4):127-134.

[15]胡琪琪,顾韩.室外热舒适影响因素及其评价指标研究进展[J].中国城市林业,2023,21(1):43-49.

[16]陈睿智,韩君伟.湿热气候区城市露天开放性空间景观要素对微气候舒适度的影响研究[J].城市建筑,2017(1):39-42.

[17]智颖,况达.澳门历史街区议事厅前地夏季热舒适度模拟及提升策略[J].中国城市林业,2023,21(4):135-143.

[18]邱巧玲,王凌.基于街道峡谷污染机理的城市街道几何结构规划研究[J].城市发展研究,2007,14(4):78-82.

[19]POTCHTER O,COHEN P,LIN T P,et al.Outdoor human thermal perception in various climates:acomprehensive review of approaches,methods and quantification[J].The Science of the Total Environment,2018,631/632:390-406.

[20]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.

[21]ASHRAE.2009 ASHRAE handbook-fundamentals[M].Atlanta:ASHRAE Inc,2009.

[22]HÖPPE P.The physiological equivalent temperature-a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment[J].International Journal of Biometeorology,1999,43(2):71-75.

[23]朱焱,杨金彪,朱莲芳,等.苏州城市化进程与城市气候变化关系研究[J].气象科学,2012,32(3):317-324.

[24]CHEN X,GAO L X,XUE P N,et al.Investigation of outdoor thermal sensation and comfort evaluation methods in severe cold area[J].Science of the Total Environment,2020,749:141520.

[25]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.

[26]高竹青.基于儿童不同季节活动特征的住区户外公共空间设计研究:以寒地城市哈尔滨为例[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.

[27]李翠燕.湿热地区儿童户外活动空间热舒适评价及优化策略研究[D].广州:华南理工大学,2021.

[28]王庆,孙浩东,谢晓欢.基于微气候舒适度的公园休憩空间景观优化[J].中国城市林业,2022,20(5):10-15.

[29]冷红,马彦红.应用微气候热舒适分区的街道空间形态初探[J].哈尔滨工业大学学报,2015,47(6):63-68.