

乔木绿化特征对生活型街道热环境的影响

曹林森¹, 张丽琴², 成文劼¹, 郑扬焱¹

(1. 江苏师范大学, 江苏 徐州 221116; 2. 泰安市林业保护发展中心, 山东 泰安 271000)

摘要:生活型街道热环境研究对于生态宜居城市的建设具有重要意义。以徐州市典型生活型街道为例, 利用正交试验和 Envi-met 模拟研究乔木绿化特征对街道峡谷空间的微气候及热舒适的影响规律。研究发现: (1) 乔木叶面积指数 (*LAI*) 与街道风速、气温、太阳辐射温度和生理等效温度 (*PET*) 均呈负相关, 与含湿量呈正相关; 枝下高与风速呈正相关, 与气温、太阳辐射温度和 *PET* 呈负相关; 随着乔木冠幅的增大, 街道风速、气温、辐射温度和 *PET* 都呈先降后升的趋势; 乔木绿化覆盖率与街道风速、气温、太阳辐射温度和 *PET* 都呈负相关。(2) 乔木冠幅和绿化覆盖率 2 要素对街道微气候和热舒适的影响最为显著; 乔木绿化对南北向街道的影响更为显著。(3) 对于该研究模型, 乔木绿化特征的最优组合是 *LAI* 为 4.8, 枝下高为 5 m, 乔木冠幅为 5 m, 绿化覆盖率为 60%。基于研究结论, 提出典型生活型街道乔木绿化策略。

关键词:绿化特征; 生活型街道; 微气候; 热舒适

中图分类号: X16 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-7380.2023.06.006

Effects of arbor greening characteristics on the thermal environment of living-style street

Cao Linsen¹, Zhang Liqin², Cheng Wenjie¹, Zheng Yangyan¹

(1. Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China; 2. Tai'an Forestry Protection and Development Center, Tai'an 271000, China)

Abstract: The research on the thermal environment of living-style street canyon space is of great significance for the construction of ecological and livable cities. This study takes a typical residential street in Xuzhou City as an example, and uses orthogonal experiments and Envi-met simulation to study the impact of tree greening characteristics on the microclimate and thermal comfort of street space. Results were found that: 1) Tree leaf area index (*LAI*) was negatively correlated with street wind speed, temperature, solar radiation, and *PET*, but positively correlated with air humidity; The height under branches was positively correlated with wind speed, but negatively correlated with temperature, solar radiation, and *PET*; As the canopy width of the trees increased, the street wind speed, temperature, radiation, and *PET* all showed a trend of first decreasing and then increasing; The coverage rate of tree greening was negatively correlated with street wind speed, temperature, solar radiation, and *PET*. 2) The two factors of tree crown width and green coverage had the most significant impact on the microclimate and thermal comfort of streets, with more significant impact of tree greening on north-south streets. 3) For this research model, the optimal combination of tree greening characteristics was *LAI* of 4.8, branch height of 5 m, tree crown width of 5 m, and green coverage rate of 60%. Based on the research findings, the greening strategies with trees for greening typical residential streets were proposed.

Key words: Greening characteristics; Living-style street; Microclimate; Thermal comfort

收稿日期: 2023-10-08; 修回日期: 2023-11-12

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD0705); 江苏省高等学校自然科学研究面上项目“面向热舒适改善的夏热冬冷地区屋顶花园设计策略研究” (21KJD220002); 江苏省高校哲学社会科学研究一般项目“城市双修背景下徐州城市空间特色塑造策略研究” (2022SJYB1139)

作者简介: 曹林森 (1989-), 男, 山东泰安人, 讲师, 博士。研究方向: 景观规划设计。E-mail: hahalinsen@163.com

生活型街道主要是指宽度约在 20—30 m, 为居民提供日常交通往来、社区人际交往、生活公共服务等功能的城市空间^[1]。作为居民日常生活使用最频繁的公共空间之一, 优化生活型街道峡谷空间热环境, 提供更舒适的空间体验, 对于生态宜居城市的建设具有重要意义^[2]。

近年来, 国内外关于街道峡谷空间热环境研究主要围绕空间微气候及热舒适, 以街道几何形态和植被绿化为对象, 探索街道几何形态与植被绿化特征对街道热环境的影响规律。其中街道几何形态主要涉及街道高宽比、街道走向及立面形式等^[3-6], 植被绿化特征主要涉及绿化布局模式(如街道 2 侧布局、中间布局、单侧布局等)、绿化组合方式(乔木+灌木+草地)、绿化覆盖率及植被冠层特征(冠幅、叶面积指数 LAI 等)^[7-9]。相关研究多通过控制单一变量的方式来探究街道几何形态或植被绿化特征对热环境的影响规律, 而在实际场景中, 空间热环境往往受到多种特征的共同作用, 但目前此类研究较少^[10]。同时乔木作为影响街道空间热环境的主要景观要素, 缺少对其绿化特征的针对性研究。

本研究以徐州市生活型街道为例, 在实地调研的基础上提取乔木绿化特征为分析要素, 利用正交试验法及 ENVI-met 气候模拟方法, 定量分析乔木绿化特征对生活型街道微气候和热舒适的影响规律, 寻求最优的街道乔木绿化方案, 并提出量化的设计建议, 以期为城市生活型街道的热环境设计和改造提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 ENVI-met 模型验证

为验证 ENVI-met 模型的可靠性, 选择徐州市南京路步行街 4 个点位从 8:00—18:00 开展温、湿度测量, 与 ENVI-met 的模拟结果相比较。结果表明

实测温度与模拟温度最大点位差 1.2℃, 最小点位差 0.2℃, 方差 0.43℃, 2 者相关系数 0.86; 实测湿度与模拟湿度最大点位差 4.1%, 最小点位差 0.6%, 方差 5.5%, 2 者相关系数 0.88; 整体显示 ENVI-met 模拟结果能较好反映街道空间微气候特征, 适用于本研究^[11]。

1.2 明确试验目标

正交试验是一种安排多因素试验的数理统计方法, 可获得各因素的重要性排序及对试验指标的影响程度, 获取试验因素的最优组合。借助正交试验法设计模拟方案进行多因素量变模拟, 可以量化研究乔木绿化特征对街道峡谷空间热环境的影响规律。本研究将街道峡谷空间微气候参数(空气温度、风速、太阳辐射温度和含湿量)及热舒适度指标, 即生理等效温度(Physiologically Equivalent Temperature, PET)作为试验目标。PET 不仅综合考虑空气温度、湿度等各项气象参数, 同时也关注到人的衣着、代谢等个体参数, 已被证实是更适宜评估人类室外热感觉的指标^[12]。 $PET = (\text{代谢能量} + \text{所获太阳辐射量} + \text{所获地球辐射量}) - (\text{蒸发热损耗} + \text{对流热损耗} + \text{地面辐射散射})$ 。

1.3 街道模型构建

生活型街道的空间特征包括建筑高度、街道宽度、高宽比和街道朝向 4 个方面。在利用百度街景对徐州市 23 条生活型街道调查研究的基础上, 根据城市设计相关规范进行生活型街道理想模型构建: 街道宽 24 m, 其中东西向街道建筑东西向布置, 7 层(7F)高 21 m, 长 24 m, 东西间距 6 m。南北向街道两侧居住建筑东西向布置, 7 层(7F)高 21 m, 长 24 m, 南北间距 24 m; 商业建筑 2 层(2F)高 7 m, 分布于道路 2 侧。在 ENVI-met 中构建生活型街道模型, 建筑及街道表面材质采用系统默认值。

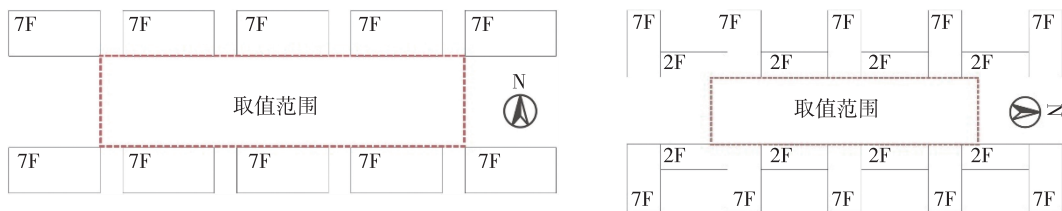


图1 东西向(左)及南北向(右)街道模型平面示意图

1.4 设计因素及水平

根据前人研究成果及预试验分析结果, 乔木

LAI、枝下高、冠幅及绿化覆盖率是影响空间热环境效应的重要特征^[13], 因此将其选为本文的试验因

素。*LAI* 表征单位面积上覆盖的植物叶片总面积,直接影响林荫空间的遮阴效果。枝下高决定了乔木林荫空间的开敞性,冠幅和绿化覆盖率影响乔木的遮阴效果和蒸腾作用。徐州市主要街道常绿绿化树种为桂花 (*Osmanthus fragrans*)、银杏 (*Ginkgo biloba* L.)、榉树 (*Zelkova schneideriana*)、香樟 (*Cinnamomum camphora*) 等,根据现场调查研究及文献梳理^[14-15],设置 *LAI* 取值范围约为 2.4—6,枝下高为 2—5 m,乔木冠幅 3—9 m,乔木绿化覆盖率 24%—60%。每个因素设置 4 个常见水平值,结果如表 1 所示。

本研究采用 $L16(4^5)$ 正交表,第 5 个因素为“空白”列,以降低前 4 个因素间存在的随机错误和相互作用。东西向、南北向街道试验方案分别为 16 组,共 32 组(见表 2)。以此建立街道工况模型,并进行微气候模拟。

表 1 $L16(4^5)$ 正交试验方案因素水平

水平	试验因素				
	<i>LAI</i> (A) /(m^2/m^2)	枝下高(B) /m	冠幅(C) /m	覆盖率(D) /%	空白列 (E)
1	2.4(A1)	2(B1)	3(C1)	24(D1)	空白(E1)
2	3.6(A2)	3(B2)	5(C2)	36(D2)	空白(E2)
3	4.8(A3)	4(B3)	7(C3)	48(D3)	空白(E3)
4	6.0(A4)	5(B4)	9(C4)	60(D4)	空白(E4)

表 2 模拟试验方案

序号	A	B	C	D	E	序号	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1	9	3	1	3	4	2
2	1	2	2	2	2	10	3	2	4	3	1
3	1	3	3	3	3	11	3	3	1	2	4
4	1	4	4	4	4	12	3	4	2	1	3
5	2	1	2	3	4	13	4	1	4	2	3
6	2	2	1	4	3	14	4	2	3	1	4
7	2	3	4	1	2	15	4	3	2	4	1
8	2	4	3	2	1	16	4	4	1	3	2

1.5 ENVI-met 参数设置及模拟

根据表 2 中乔木形态特征参数值,利用 ENVI-metAlbero 模块构建 16 种不同形态特征的乔木模型。模拟日期为 2022 年夏至日(6 月 21 日),参照徐州市历年夏至日气候平均参数(<http://data.cma.cn/>),设置气候初始数据为风速 3.2 m/s,风向 135°(东南风),空气温度最低 21.8 ℃(6:00),最高 29.8 ℃(16:00),相对湿度为 70%—85%,其他模拟参数设置如表 3 所示。

表 3 ENVI-met 模拟及计算的参数设定

类别		参数值
基础数据	网格尺寸/数量	3 m×3 m×3 m(30×60×20)
嵌套网格	嵌套网格数	5
模拟时间	日期	2022. 06. 21
	起始时间	6:00
	模拟时长/h	24
	风速/(m/s)	3.2
气象数据	风向/°	135
	温度/K	295(6:00)—303(16:00)
	相对湿度/%	70(16:00)—85(6:00)
	地表粗糙度	0.01
	衣阻	0.5
热舒适	身体参数	Biomet 软件默认

2 结果与分析

导出微气候特征较为明显的时间段 9:00—16:00 的数据(高度 1.5 m),并计算场地热舒适 *PET* 值(见表 4)。利用 SPSS21.0 对试验结果进行极差分析和方差分析,得到乔木绿化特征对街道微气候及 *PET* 产生作用的主次关系、显著性及影响规律。

2.1 东西向街道

2.1.1 乔木绿化特征对微气候的影响 影响主次方面:如表 5 所示,根据极差结果(*r*)对比,影响风速的试验因素排序为 *LAI*>冠幅>枝下高>覆盖率(*A*>*C*>*B*>*D*),方差结果显示 *LAI* 对风速的影响显著(*Sig.*<0.05,如表 6,下同)。影响气温的试验因素排序为冠幅>覆盖率>*LAI*、枝下高(*C*>*D*>*A*,*B*),方差结果显示冠幅与覆盖率的影响显著。影响太阳辐射温度试验因素排序为冠幅>覆盖率>*LAI*>枝下高(*C*>*D*>*A*>*B*),方差结果显示冠幅与覆盖率的影响显著。影响含湿量的试验因素排序为 *LAI*>枝下高>冠幅>覆盖率(*A*>*B*>*C*>*D*),方差结果显示 *LAI* 的影响显著。

影响趋势方面:如图 2—5 所示,*LAI* 与街道风速、气温和太阳辐射温度整体成负相关,与含湿量呈正相关。枝下高与风速整体呈正相关,与太阳辐射温度和气温整体呈负相关,与含湿量的相关性不明显。冠幅对风速、气温和太阳辐射温度的影响都是先降低后升高,对含湿量的影响不明显。覆盖率与风速、气温和太阳辐射温度都呈负相关;覆盖率与街道湿度的相关性不明显。

2.1.2 乔木绿化特征对 *PET* 的影响 影响主次方面:如表 5 所示,乔木绿化特征对东西向街道热舒适影响排序为冠幅>覆盖率>枝下高>*LAI*(*C*>*D*>*B*>

A),其中冠幅极差值约为3℃,覆盖率极差值约为2.5℃。方差分析结果显示(见表6),冠幅和覆盖率2个因素对街道热舒适的影响均为显著,*LAI*和枝下高2因素对街道热舒适没有显著影响。影响趋势方面:如图6所示,*LAI*、枝下高和覆盖率与街道*PET*整体呈负相关,冠幅对*PET*的影响为先降低后升高。在本模拟研究中,当乔木冠幅为5m时,可以获得最小的*PET*值。

2.2 南北向街道

2.2.1 乔木绿化特征对微气候的影响 影响主次方面如表5、6所示,影响风速的试验因素排序为*LAI*>冠幅>覆盖率>枝下高($A>C>D>B$),乔木所有绿化特征对街道风速的影响均为显著。影响气温的试验因素排序为冠幅>覆盖率>*LAI*>枝下高($C>D>A>B$),其中冠幅与覆盖率的影响显著。影响太阳辐射温度的试验因素排序为冠幅>覆盖率>*LAI*>枝下高($C>D>A>B$),所有绿化特征对街道太阳辐射的影响也均为显著。影响含湿量的试验因素排序为*LAI*>枝下高=冠幅>覆盖率($A>B=C>D$),其中只有*LAI*的影响显著。可见南北向街道分析结果与东西向街道基本类似,总体南北向街道乔木绿化特征对街道微气候的影响更为显著。如图2—5所示,影响趋势方面南北向街道与东西向街道几乎一致。

2.2.2 乔木绿化特征对*PET*的影响 影响主次方面如表5所示,乔木绿化特征对南北向街道热舒适影响排序为冠幅>覆盖率>枝下高>*LAI*($C>D>B>A$),其中冠幅极差值约为2.3℃,覆盖率极差值约为1.9℃。方差分析结果显示,乔木4个绿化特征对街道热舒适的影响均为显著。如图6所示,乔木绿化特征对*PET*的影响趋势方面南北向街道与东西向街道保持一致。

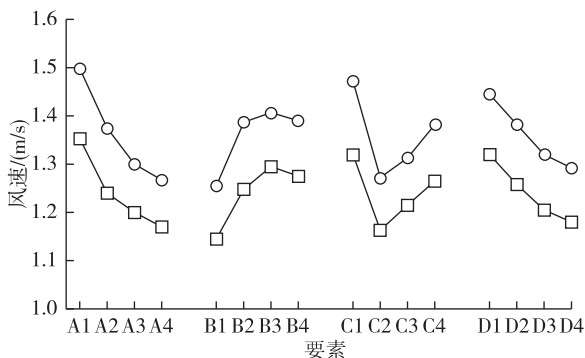


图2 各要素对风速的影响趋势

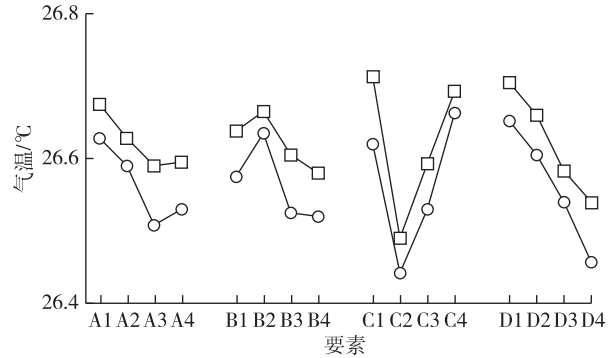


图3 各要素对空气温度的影响趋势

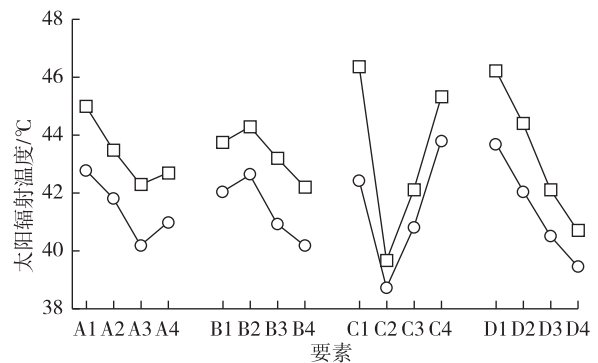


图4 各要素对太阳辐射温度的影响趋势

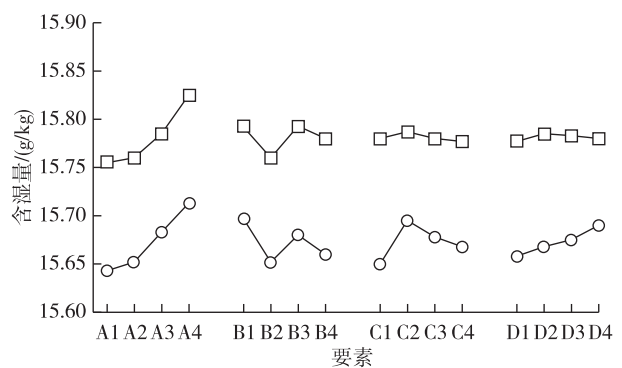


图5 各要素对含湿量的影响趋势

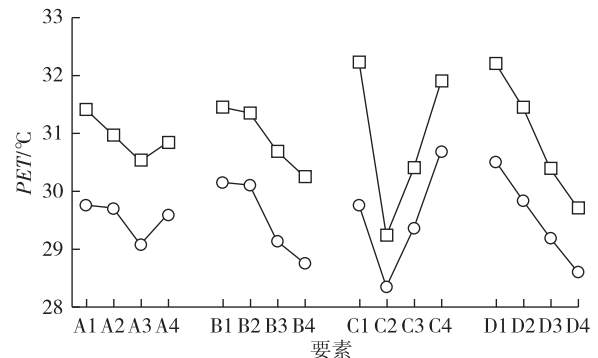


图6 各要素对热舒适的影响趋势

注:图2—6中,□代表东西向街道,○代表南北向街道

表 4 模拟方案组合及试验结果

试验 组合	东西向街道					南北向街道				
	风速/(m/s)	气温/℃	辐射温度/℃	含湿量(g/kg)	PET/℃	风速/(m/s)	气温/℃	辐射温度/℃	含湿量/(g/kg)	PET/℃
1	1.44	26.85	51.09	15.77	34.34	1.61	26.76	46.70	15.64	31.54
2	1.31	26.64	43.95	15.74	30.93	1.47	26.61	41.92	15.64	29.44
3	1.31	26.58	41.60	15.76	29.79	1.43	26.55	40.52	15.65	28.86
4	1.35	26.63	43.35	15.75	30.59	1.48	26.59	42.00	15.64	29.20
5	1.03	26.48	39.15	15.78	29.36	1.14	26.47	38.88	15.70	28.79
6	1.23	26.67	44.01	15.73	31.17	1.42	26.63	41.80	15.62	29.59
7	1.41	26.78	48.82	15.76	33.25	1.54	26.73	45.98	15.64	31.44
8	1.29	26.58	41.95	15.77	30.10	1.40	26.53	40.61	15.65	29.02
9	1.03	26.51	39.44	15.79	29.57	1.09	26.37	38.23	15.73	28.59
10	1.22	26.65	43.73	15.77	31.19	1.33	26.63	42.85	15.67	30.41
11	1.35	26.71	46.40	15.80	32.21	1.48	26.58	41.40	15.66	29.20
12	1.20	26.49	39.59	15.78	29.12	1.30	26.45	38.29	15.67	28.11
13	1.08	26.71	45.33	15.83	32.53	1.18	26.70	44.38	15.72	31.69
14	1.23	26.70	45.48	15.80	32.12	1.33	26.67	43.92	15.68	30.98
15	1.11	26.35	36.00	15.85	27.52	1.18	26.24	35.83	15.77	27.05
16	1.26	26.62	43.98	15.82	31.21	1.38	26.51	39.83	15.68	28.70

表 5 各因素影响微气候及 PET 指标的极差分析

因素		东西向街道					南北向街道				
		K1	K2	K3	K4	r	K1	K2	K3	K4	r
风速	A	1.353	1.240	1.200	1.170	0.183	1.498	1.375	1.300	1.267	0.231
	B	1.145	1.248	1.295	1.275	0.150	1.255	1.387	1.407	1.390	0.152
	C	1.320	1.163	1.215	1.265	0.157	1.472	1.272	1.313	1.382	0.200
	D	1.320	1.258	1.205	1.180	0.140	1.445	1.382	1.320	1.292	0.153
	E	1.265	1.252	1.205	1.240	0.060	1.380	1.370	1.332	1.357	0.048
气温	A	26.675	26.628	26.590	26.595	0.085	26.628	26.590	26.508	26.530	0.120
	B	26.638	26.665	26.605	26.580	0.085	26.575	26.635	26.525	26.520	0.115
	C	26.713	26.490	26.593	26.693	0.223	26.620	26.442	26.530	26.663	0.221
	D	26.705	26.660	26.583	26.540	0.165	26.652	26.605	26.540	26.457	0.195
	E	26.608	26.638	26.612	26.630	0.030	26.540	26.555	26.582	26.578	0.042
辐射温度	A	44.998	43.483	42.290	42.697	2.708	42.785	41.817	40.192	40.990	2.593
	B	43.752	44.292	43.205	42.218	2.074	42.047	42.623	40.933	40.183	2.440
	C	46.370	39.672	42.117	45.308	6.698	42.433	38.730	40.820	43.802	5.072
	D	46.245	44.407	42.115	40.700	5.545	43.722	42.078	40.520	39.465	4.257
	E	43.193	44.047	42.633	43.595	1.414	41.498	41.490	41.247	41.550	0.303
含湿量	A	15.755	15.760	15.785	15.825	0.070	15.643	15.652	15.683	15.713	0.070
	B	15.792	15.760	15.793	15.780	0.033	15.697	15.652	15.680	15.660	0.045
	C	15.780	15.787	15.780	15.777	0.010	15.650	15.695	15.678	15.668	0.045
	D	15.777	15.785	15.783	15.780	0.008	15.658	15.668	15.675	15.690	0.032
	E	15.790	15.777	15.775	15.782	0.015	15.683	15.673	15.665	15.670	0.018
PET	A	31.413	30.970	30.523	30.845	0.890	29.760	29.710	29.078	29.605	0.682
	B	31.450	31.352	30.692	30.255	1.195	30.152	30.105	29.137	28.758	1.394
	C	32.233	29.232	30.395	31.890	3.001	29.758	28.348	29.363	30.685	2.337
	D	32.208	31.443	30.388	29.713	2.495	30.518	29.837	29.190	28.607	1.911
	E	30.787	31.240	30.652	31.070	0.588	29.505	29.543	29.563	29.543	0.058

表6 各因素影响微气候及 *PET* 指标的方差分析

因素	A(<i>LAI</i>)	B(枝下高)	C(冠幅)	D(覆盖率)
风速	0.048 *	0.077	0.075	0.092
气温	0.065	0.074	0.004 **	0.011 *
东西向 辐射温度	0.145	0.271	0.012 *	0.023 *
含湿量	0.014 *	0.100	0.748	0.865
<i>PET</i>	0.304	0.124	0.011 *	0.021 *
风速	0.013 *	0.036 *	0.020 *	0.040 *
气温	0.064	0.068	0.013 *	0.020 *
南北向 辐射温度	0.003 **	0.003 **	0.000 **	0.001 **
含湿量	0.019 *	0.065	0.079	0.167
<i>PET</i>	0.001 **	0.000 **	0.000 **	0.000 **

注: *, ** 分别表示在 0.05, 0.01 水平上具有差异显著性

3 讨论与结论

3.1 原因分析

景观空间热舒适是由空间微气候要素和人体生理状况共同影响决定,微气候各要素之间同样存在相互影响关系^[16]。乔木 *LAI* 反映冠层遮蔽度,随着冠层遮蔽度的增大,乔木对风和太阳辐射的遮挡能力加强,从而显著降低风速、太阳辐射和空气温度;同时乔木蒸腾能力加强,从而增大环境湿度。研究发现本试验中乔木 *LAI* 并不是越大越好,当乔木 *LAI*>4.8 时,*PET* 由降低趋势转为升高趋势,即热舒适度转为降低趋势,这与郑雅心的研究结论有所不同^[13]。可能的原因是对于街道特殊的空间特点,随着叶面积指数的不断增大,街道空间的通风性减弱及湿度增大效果明显,致使街道空间 *PET* 略有升高。枝下高影响树木的林下空间开敞度和树冠的高度。随着枝下高增大,空间开敞度和树冠高度增加,空间风速增大,太阳辐射减小和空气温度降低,致使街道空间 *PET* 减小,热舒适提升。冠幅影响乔木的三维绿量和遮阴等能力。本研究中,随着乔木冠幅的增大,树木风速、气温、太阳辐射温度和 *PET* 都呈先降低后升高的趋势,这与王琨等的研究结果也存在差异^[17]。可能的原因是由于街道空间形态的特殊性,街道 2 侧建筑及建筑形成的阴影对冠幅的调节作用产生影响,弱化了过大冠幅的微气候调节作用。本研究中,当乔木冠幅为 5 m 时,可以获得较优的热舒适。乔木覆盖率的增大会遮挡风和太阳辐射,导致街道空间风速、太阳辐射温度和气温都有明显下降趋势,从而降低空间的 *PET*,提升空间热舒适度。

本研究中,东西向和南北向街道乔木的绿化特征对微气候要素和 *PET* 的影响趋势一致,影响主次方面的差异,主要原因应该在于不同朝向街道的光照和风速存在差异。东西向建筑的遮阴效果相对更强,弱化了植被对微气候的调节作用。所以相比而言,南北向街道乔木绿化特征对街道微气候和热舒适的影响更为显著。

3.2 街道乔木绿化建议

根据本研究的模拟结果,建议在类似的生活型街道绿化中,应尽量使用叶面积指数较大的乔木作为绿化树种。以徐州市为例,可以选择悬铃木(*Platanus hispanica*)、香樟(*Cinnamomum camphora*)、广玉兰(*Magnolia grandiflora*)等 *LAI* 值在 4.8 左右的乔木作为主要绿化树种。同时注意提高乔木的枝下高,扩大乔木林下空间的开敞度。乔木冠幅和绿化覆盖率对街道空间微气候和 *PET* 的影响尤为显著,应重视对 2 要素的设计。如乔木冠幅应修剪至 5 m 左右适中大小,不宜使用过大或过小冠幅的乔木。乔木绿化覆盖率应尽量增大,以最大限度发挥乔木对街道热舒适的调节作用。南北向街道乔木对空间微气候和 *PET* 的影响更为显著,所以在南北向街道的绿化中更应加强乔木各要素的设计。

本试验中,乔木绿化特征的最优组合是 *LAI* 为 4.8,枝下高为 5 m,乔木冠幅为 5 m,绿化覆盖率为 60%。不同的街道形态可能会对模拟试验结果产生影响。建议在实际设计中,可以根据实际街道形态、朝向和高宽比等特征建立街道模型,利用正交试验方法有针对性地模拟分析植被绿化对街道热舒适的影响,以获取最优的绿化设计策略。

3.3 结论

本研究以徐州市典型生活型街道为例,探究乔木绿化特征对街道空间微气候及热舒适的主次作用和影响趋势。研究发现乔木冠幅和绿化覆盖率 2 要素对街道热环境的影响最为显著,*LAI* 和枝下高 2 因素也有不同程度的影响,且对南北向街道的影响比东西向街道更为明显。最后基于研究结论提出了街道绿化设计策略。本研究只以一种典型生活型街道峡谷为例进行模拟分析,对于其他类型空间具有方法上的参考性。在今后的研究及设计实践中,可以依据特定的景观空间构建模型并设计正交试验,以研究对空间微气候及热舒适影响的主要因素,分析景观要素的最优配置方案。

参考文献:

- [1] 王 庆,邱智豪,孙浩东,等.基于 ENVI-met 微气候模拟的生活性街道景观优化[J].住区,2022,110(4):138-146.
- [2] 杜晓寒,石玉蓉,张宇峰.广州生活性街谷热环境数值模拟研究与设计[J].建筑科学,2015,31(12):78-87.
- [3] CAO L S, XU H, LI H. Effect of greening trees on thermal comfort of the pedestrian streets in hot summer and cold winter regions in China[J]. Nature Environment and Pollution Technology, 2022, 21(4):1543-1552.
- [4] ANDREOU E. Thermal comfort in outdoor spaces and urban canyon microclimate[J]. Renewable Energy, 2013, 55:182-188.
- [5] 潘剑彬,王若晨,翟 莹,等.北京城市街道空间几何形态与热环境研究[J].沈阳建筑大学学报(社会科学版),2021,23(5):438-444.
- [6] 王 一,刘淑媛,黄子硕.上海小陆家嘴地区街道形态对街道热舒适的影响研究[J].住宅科技,2020,40(5):11-17.
- [7] LOBACCARO G, ACERO J A. Comparative analysis of green actions to improve outdoor thermal comfort inside typical urban street canyons[J]. Urban Climate, 2015, 14:251-267.
- [8] 胡 杨,马克明.城市街道绿化对空气质量及微气候影响的综合模拟研究[J].生态学报,2021,41(4):1314-1331.
- [9] 高仰驰,余坤勇,刘艳芬,等.冠顶式步道秋季微气候效应研究——以福州“福道”为例[J].西北林学院学报,2021,36(1):266-272.
- [10] 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.
- [11] 曹林森,徐 欢,李 红.南京市寒冷季节景观树种对人体热舒适度影响的数值模拟研究[J].西北林学院学报,2021,36(5):238-245.
- [12] 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.
- [13] 郑雅心.基于 ENVI-met 模拟的绿化对夏热冬冷地区城市生活性街道热环境的影响研究[D].武汉:华中农业大学,2021.
- [14] 黄钰麟,傅伟聪,陈晶茹,等.植物群落特征对夏季公园林荫空间微气候的影响研究[J].中国园林,2022,38(3):118-123.
- [15] 乔小菊.南京城区园林绿化中常见阔叶乔木树种的光合特性及相关生态功能的研究[D].南京:南京农业大学,2016.
- [16] 金 虹,王 博.城市微气候及热舒适性评价研究综述[J].建筑科学,2017,33(8):1-8.
- [17] 王 琨,王竞娴,田朝阳,等.乔木覆盖率及形态特征对公园夏季微气候舒适性的调节作用——以郑州市绿荫公园为例[J].中国园林,2022,38(11):94-99.

(上接第 20 页)

较快,故证明茎叶适宜在 6-BA 1.0 mg/L 发育,在初代诱导时:MS+6-BA 1.0 mg/L +NAA0.3 mg/L 的诱导效果最佳。但在诱导芽过程当中始终存在子叶肥大、根部长愈伤的情况,导致真叶生长缓慢,诱导成苗的时间较长,需至少 40 d 以上才可得到继代所用成苗。故关于蕤核初代诱导阶段的培养基还需要进一步筛选验证。

在继代试验过程中,采用正交试验和极差分析法找到最适的增殖培养基,达到较好的增殖效果,以 MS+1.0 mg/L 6-BA+0.3 mg/L NAA+0.1 mg/L IBA 为最适培养基,增殖系数达到 2.83%。

在生根培养过程中可以发现,蕤核苗适合在添加活性炭的条件下生根。IBA 和 NAA 在生根诱导试验中广泛使用,故蕤核在单独分别添加 2 种激素的情况下生根较迅速。当 IBA, NAA 质量浓度为 1.0 mg/L 时,其生根速率高于 0.5 mg/L 及 1.5 mg/L 时,根多且长,长势迅速,叶绿且茎健壮。IBA 和 NAA 相比生根率差别不显著,但 NAA 在培养过程中平均根数较少,长势较慢。故蕤核生根最适培养基为 1/2 MS+1.0 mg/L IBA+0.3 g/L 活性炭。

现如今对蕤核组织培养快繁体系的研究基本

空白,本试验通过以蕤核种子为外植体建立蕤核种子诱导芽的快繁体系,为良种选育以及遗传改良等领域提供了一定的借鉴作用和参考价值。

参考文献:

- [1] 《内蒙古植物志》编辑委员会.内蒙古植物志:第二版[M].呼和浩特:内蒙古人民出版社,1998.
- [2] 杨慧滨.蕤核人工驯化与繁育技术研究[Z].山西:晋中市林业科学研究所,2011.
- [3] 李鸿杰.蕤核的繁殖及利用[J].林业实用技术,2002(4):26-27.
- [4] 石绍玲.蕤核的经济价值及育苗技术[J].现代农业科技,2013(18):101.
- [5] 杨福红,赵晓明,赵海燕,等.蕤核的研究进展[J].山西农业科学,2008(9):94-96.
- [6] 斯 琴.蕤核繁殖生物学特性及经济价值的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2007.
- [7] 刘王锁.蕤核综合价值的研究进展[J].青海农林科技,2020(3):67-69.
- [8] 卢 思.植物组织培养技术及应用[J].科技展望,2016,26(11):73.
- [9] 那 倩,韩 琳.浅谈植物组织培养技术及应用[J].广东蚕业,2021,55(5):23-24.
- [10] 唐 链,田爽琪.植物组织培养技术的应用进展[J].现代园艺,2022,45(18):24-26.