

城市公园不同植物配植类型与温湿效应的关系

郑钰旦¹,朱思媛¹,方梦静¹,吴海堂¹,晏 海¹,邵 锋^{1,2*}

(1.浙江农林大学 风景园林与建筑学院,浙江 杭州 311300;2.北京林业大学 园林学院,北京 100083)

摘要:对杭州城北体育公园3种不同植物配植类型绿地(乔-灌-草型、乔-草型、草坪型)的空气温度、相对湿度和光照强度进行实地测量,并采用不舒适指数作为评价指标,对比分析城市公园不同植物配植类型绿地的人体舒适度差异。结果表明,不同植物配植类型绿地都有一定的降温增湿效果,降温增湿效应依次为乔-灌-草型>乔-草型>草坪型,相对于前两者,草坪型的降温增湿效果并不显著。而日均不舒适指数依次为草坪型($30.8 \pm 0.2a$)>乔-草型($29.1 \pm 0.3b$)>乔-灌-草型($28.9 \pm 0.3c$),乔-灌-草型和乔-草型绿地的不舒适指数均有显著差异。在城市公园建设中,风景园林设计师应考虑植物配植类型的多样性与稳定性,适当增加乔-灌-草和乔-草类型的绿地。

关键词:风景园林;城市公园;植物配植类型;温湿效应;不舒适指数

中图分类号:S731.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2020)03-0243-07

Relationships between Different Types of Plant Arrangement and Temperature-humidity Effects in Urban Parks

ZHENG Yu-dan¹, ZHU Si-yuan¹, FANG Meng-jing¹, WU Hai-tang¹, YAN Hai¹, SHAO Feng^{1,2*}

(1. School of Landscape Architecture, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China;

2. School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Through the field measurements of the air temperature, relative humidity and light intensity of three different plant arrangement types of green spaces (tree-shrub-herb, tree-herb, and lawn) in the North City Sports Park of Hangzhou, and using the discomfort index as the evaluation indicator, we compared and analyzed the differences of human comfort in different plant arrangement types of green spaces in urban parks. The results showed that different plant arrangement types of green spaces had certain cooling and humidifying effects, which successively followed the sequence of tree-shrub-herb > tree-herb > lawn, in which cooling and humidifying effect of the lawn type was not significant. The average daily discomfort index was in the order of lawn ($30.8 \pm 0.2a$) > tree-herb ($29.1 \pm 0.3b$) > tree-shrub-herb ($28.9 \pm 0.3c$). The discomfort indexes of tree-shrub-herb and tree-herb types of green spaces were significantly different. Therefore, when designing landscape architects in urban parks, the diversity and stability of plant arrangement types should be considered, and appropriately green spaces as tree-shrub-herb and tree-herb types should be emphasized.

Key words: landscape architecture; urban park; plant arrangement type; temperature-humidity effects; discomfort index

城市公园在城市绿地建设中起着至关重要的作用,它能为人们提供优美舒适的休闲空间,缓解人们

紧张的生活节奏。随着人们对环境品质的要求越来越高,城市公园的建设应更多地发挥其改善环境的

收稿日期:2019-06-28 修回日期:2019-08-22

基金项目:国家自然科学基金(51508515)。

作者简介:郑钰旦。研究方向:园林植物应用与园林生态。E-mail:582167553@qq.com

*通信作者:邵锋,副教授。研究方向:园林植物应用与园林生态。E-mail:shaofeng79@sina.com

作用,特别是在人居热环境方面。植物景观是城市公园的基本景观和重要组成部分,由丰富的植物种类、多样的配植类型和其他要素共同构成^[1]。随着城市化进程的加快,国内外学者对植物的温湿效应方面开展了一系列研究,从运用遥感、GIS 等大尺度分析到实地观测等小尺度研究,研究样地涉及校园绿地、公园绿地、居住区绿地、滨河绿地等^[2-6]。对公园绿地的研究主要集中在北方,南方较少。不同地区由于空间、时间的差异会造成结果的不同^[7]。研究发现,绿地对环境温湿度的影响夏季较大,冬季较小,且夏季白天的差异比夜晚大^[8]。不同研究结果也表明,除了空间、时间,不同的植物冠层^[9-11]、植物种类^[12-13]、植物配植类型^[14]、植被覆盖率^[15]、下垫面^[16-17]等都会对温湿度产生影响。近些年,更多学者意识到城市绿地服务的主体是人,因此在探讨绿地的温湿效应外^[18],还将人体舒适度作为主要评价标准。多数学者认为,对人体舒适度的改善程度上林地要大于草坪^[3,19]。冯悦怡等^[20]研究表明,对人体舒适度改善的绿地类型中,半天然乔-灌-草>人工乔-草>人工乔-灌-草>人工草坪。总体而言,人体舒适度研究仍较少,需要进一步深入探讨。本研究以杭州城北体育公园 3 种不同植物配植类型的绿地为对象,在夏季对其进行实地测量,总结不同绿地的光照强度、空气温度和相对湿度的日变化规律,采用不舒适指数作为评价指标,对比分析不同植物配植类型绿地的人体舒适度差异,为今后城市公园的植物配植提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

杭州位于浙江省北部、钱塘江下游、京杭大运河南端。属亚热带季风气候,四季分明、光照充足、空气湿润、雨量充沛,植被以亚热带常绿阔叶林为主。年平均气温 17.8℃(极端最高气温 42.9℃,极端最低气温 -15.0℃),平均相对湿度 70.3%,年降雨量 1 454 mm,年日照时数 1 765 h。

杭州城北体育公园位于杭州市下城区绍兴路以北、上塘河以东、规划白石路以西、规划重工路以南($120^{\circ}10'08''E, 30^{\circ}19'01''N$)。公园周边大部分是居住区,部分为机械厂和服装厂。公园总占地面积 44.8 hm²,其中篮球场、羽毛球场、游泳馆等体育设施共占 4.6 hm²,水体 3.8 hm²,绿地面积 30.2 hm²,绿地率 67.4%。水体分布在公园的西南部,呈半包围式。按照植物景观特色可将该园分为 7 个区块,分别为春花秋叶区、自然花境区、体育场馆区、湖区植物区、历史建筑保护区、竹林幽静区和生态保健

植物区(图 1)。杭州城北体育公园的植物配植对周边环境的改善及人们的休闲活动有着重要作用。该园建成至今已有 5 a,园内植物生长茂盛,群落结构已趋于稳定。

1.2 样地选择

利用 Google Earth 遥感卫星影像图片对城北体育公园的植物群落进行调查和分析,选择 3 种不同植物配植类型绿地(乔-灌-草型、乔-草型、草坪型)为研究对象(表 1)。每种类型各选 3 个样地,每个样地面积 300~400 m²。样地距水面和道路分别在 50 m 和 20 m 以外,在公园外设置 3 个对照点,对照点选择没有任何乔、灌、草覆盖,且无建筑物遮光影响的硬质铺装空地(图 1)。

1.3 研究方法

2017 年 7 月下旬,选择晴朗无风(风速 $\leqslant 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)的天气开展 3 d 连续测量。在距离地面 1.5 m 处(与成人呼吸高度基本一致),使用华谊 MS6252B 数字风速仪和 ZDS-10 型照度计对空气温度、相对湿度和光照强度进行同步测定。测量时段为 8:00—18:00,每 2 h 记录 1 次数据,得到每个测点(包括对照点)的相应数据后,计算各个样地的算术平均值和标准差。同时计算出各样地空气温度、相对湿度、光照强度的日变幅(α)及变化比率(β)。

以算术平均值作为样地空气温度和相对湿度的数值,降温率及增湿率的计算公式分别为:

$$dTair/\% = \frac{Tair_{\text{sun}} - Tair_{\text{sh}}}{Tair_{\text{sun}}} \times 100 \quad (1)$$

$$dRH/\% = \frac{RH_{\text{sh}} - RH_{\text{sun}}}{RH_{\text{sun}}} \times 100 \quad (2)$$

式中, $Tair_{\text{sun}}$ 为对照点的空气温度; $Tair_{\text{sh}}$ 为样地内的空气温度; $dTair$ 为降温率; RH_{sh} 为样地内的相对湿度; RH_{sun} 为对照点的相对湿度; dRH 为增湿率。

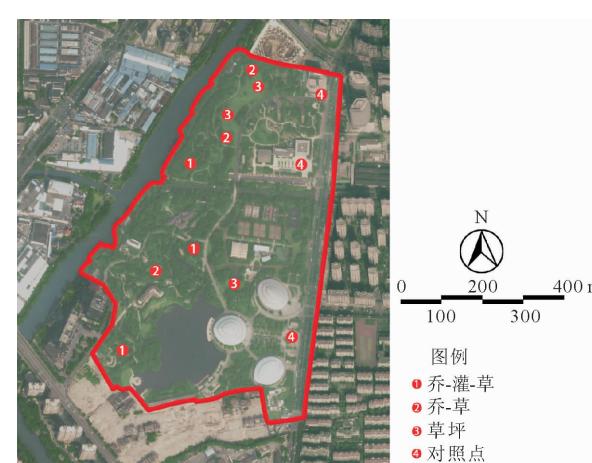


图 1 研究区域及样地

Fig. 1 Study area and sample spots

表1 杭州城北体育公园不同植物配植类型绿地情况

Table 1 The situation of different plant arrangement types of green spaces in the North City Sports Park of Hangzhou

配植类型	样地	乔木层			灌木层			草本层		
		主要植物种类	树龄/a	郁闭度	主要植物种类	高度/m	盖度/%	主要植物种类	高度/m	盖度/%
乔-灌-草型	1-a	香樟(<i>Cinnamomum camphora</i>)	23~25	0.85~0.90	红叶石楠(<i>Photinia × fraseri</i>)	1.2~1.4	50~55	麦冬(<i>Ophiopogon japonicus</i>)	0.25~0.35	30~35
		无患子(<i>Sapindus mukorossi</i>)	20~22		八角金盘(<i>Fatsia japonica</i>)	1.0~1.2				
		朴树(<i>Celtis sinensis</i>)	18~20		南天竹(<i>Nandina domestica</i>)	0.6~0.8				
		鸡爪槭(<i>Acer palmatum</i>)	13~15		红花檵木(<i>Loropetalum chinense</i> var. <i>rubrum</i>)	1.0~1.2				
	1-b	香樟	23~25	0.75~0.80	海桐(<i>Pittosporum tobira</i>)	1.3~1.5	45~50	沿阶草(<i>Ophiopogon bodinieri</i>)	0.20~0.30	30~35
		桂花(<i>Osmanthus fragrans</i>)	15~17		八角金盘	1.0~1.2				
		无患子	18~20		南天竹	0.6~0.8				
乔-草型	1-c	榉树(<i>Zelkova serrata</i>)	16~18							
		鸡爪槭	13~15							
		香樟	23~25	0.80~0.85	枸骨(<i>Ilex cornuta</i>)	1.3~1.5	50~55	麦冬	0.25~0.35	25~30
		桂花	15~17		南天竹	0.6~0.8		沿阶草	0.20~0.30	
		无患子	20~22		六道木(<i>Abelia biflora</i>)	1.2~1.4				
		红花檵木	10~12		八仙花(<i>Hydrangea macrophylla</i>)	0.6~0.8				
		西府海棠(<i>Malus × micromalus</i>)	15~17							
乔-草型	2-a	乐昌含笑(<i>Michelia chapensis</i>)	20~22	0.70~0.75	南天竹	0.6~0.8	5~10	沿阶草	0.20~0.30	70~75
		杜英(<i>Elaeocarpus decipiens</i>)	18~20		六道木	1.2~1.4				
		银杏(<i>Ginkgo biloba</i>)	22~24							
		枫香(<i>Liquidambar formosana</i>)	20~22							
		朴树	18~20							
		鸡爪槭	13~15							
	2-b	香樟	20~22	0.75~0.80	杜鹃(<i>Rhododendron simsii</i>)	0.8~1.0	5~10	沿阶草	0.20~0.30	70~75
		桂花	15~17		金丝桃(<i>Hypericum monogynum</i>)	0.8~1.0		红花酢浆草(<i>Oxalis corymbosa</i>)	0.10~0.20	
		玉兰(<i>Magnolia denudata</i>)	16~18							
		山樱花(<i>Cerasus serrulata</i>)	13~15							
草坪型	3-c	朴树	18~20							
		香樟	20~22	0.75~0.80	醉鱼草(<i>Buddleja lindleyana</i>)	1.4~1.6	10~15	沿阶草	0.20~0.30	65~70
		桂花	15~17		栀子(<i>Gardenia jasminoides</i>)	1.0~1.2				
		合欢(<i>Albizia julibrissin</i>)	16~18							
		无患子	18~20							
		朴树	18~20							
		鸡爪槭	13~15							
3-a	/	/	/	/	/	/	/	细叶结缕草(<i>Zoysia tenuifolia</i>)	0.10~0.20	96~98
	/	/	/	/	/	/	/	细叶结缕草	0.10~0.20	96~98
	/	/	/	/	/	/	/	细叶结缕草	0.10~0.20	96~98

以算术平均值作为样地光照强度的数值,遮光率的计算公式为:

$$dL/\% = \frac{L_{\text{sun}} - L_{\text{sh}}}{L_{\text{sun}}} \times 100 \quad (3)$$

式中, L_{sun} 为对照点的光照强度(lx); L_{sh} 为样地内的光照强度; dL 为遮光率^[21]。

不同气象条件下人体感觉不同,研究者通过测量分析,总结了方便人们数字化定义人体舒适度的公式。而气象条件中以空气温度和相对湿度对人体感受影响最大,本研究选用 E. C. Thom^[22]提出的不舒适指数作为评价指标,计算公式为:

$$DI = T_{\text{air}} - 0.55 \times (1 - 0.01 \times RH) \times (T_{\text{air}} - 14.5) \quad (4)$$

式中, T_{air} 为空气温度; RH 为相对湿度; DI 为不

适指数。计算出 DI 数值后,与表2进行对照,可得出人体舒适度水平。

降低不舒适指数率的计算公式如下:

$$dDI/\% = \frac{DI_{\text{sun}} - DI_{\text{sh}}}{DI_{\text{sun}}} \times 100 \quad (5)$$

式中, DI_{sun} 为对照点的不舒适指数; DI_{sh} 为样地内的不舒适指数; dDI 为降低不舒适指数率。

所有数据用Excel2016进行算数平均和标准差计算,运用SigmaPlot12.5对相关数据进行整合,绘制出不同植物配植类型绿地的空气温度、相对湿度和光照强度日变化折线图,并用SPSS20.0比较分析相应数据是否存在显著性差异,最后通过公式计算不同绿地的不舒适指数,并对其进行评价。

表 2 DI 与人体舒适度水平
Table 2 DI and human comfort levels

DI	≥ 29.5	$26.7 \sim 29.4$	$23.9 \sim 26.6$	$21.1 \sim 23.8$	< 21.1
人体舒适度	酷热,无降温措施难以工作	很热,很不舒服	热,不舒服	较热,较不舒适	凉爽,舒适

2 结果与分析

2.1 不同植物配植类型绿地的光照强度变化

从图 2 看出,草坪和对照点的光照强度呈先上升后下降的变化趋势,最大光照强度出现在 12:00—14:00,而乔-灌-草型和乔-草型的光强日变化则相对平缓。通过单因素方差分析得出光照强度排序:对照点>草坪型>乔-草型>乔-灌-草型,日均遮光率依次为:乔-灌-草型>乔-草型>草坪型(表 3),这主要是由于不同的郁闭度影响导致的。乔木叶面积指数较高,遮荫效果明显^[23]。对照点处于城市街道,易受周围建筑光污染的影响,而草坪位于公园内部,受影响较小,因此草坪的日均光照强度比对照点略小。日变幅依次为:草坪型>乔-草型>乔-灌-草型($P < 0.05$),且草坪型与对照点之间无显著差异。由于植物冠层交错叠加时林隙减少,透过林隙落到地面上的太阳辐射也会随之减少^[24]。乔-草型对太阳辐射的吸收与反射比乔-灌-草型少,这也是乔-草型比乔-灌-草型的光强日变幅更大、遮光率更小的主要原因,乔-草型与草坪型的结果同理。

表 3 不同植物配植类型绿地光照强度比较

Table 3 Comparison of light intensity in different plant arrangement types of green spaces

配植类型	光照强度		
	X/ 10^2 lx	$\alpha/10^2$ lx	$\beta/\%$
乔-灌-草型	24±1d	26±2c	95.7±0.2a
乔-草型	127±18c	249±60b	76.6±3.3b
草坪型	513±13b	825±36a	5.2±2.5c
对照点	541±9a	839±44a	/

注:X 为日均值,α 为日变幅,β 为遮光率;日均值后面的字母为不同植物配植类型间的多重比较(Duncan 显著差异法,不同字母表示差异显著, $P < 0.05$)。下同。

2.2 不同植物配植类型绿地的空气温度变化

图 3 显示了不同植物配植类型绿地的空气温度日变化情况。空气温度随时间均呈现先上升后下降的“单峰型”变化趋势,且在 12:00—16:00 达到最大值。这种变化规律可能是光照强度和绿地的热环境调节共同作用的结果。与对照点相比,明显看出各绿地均有不同程度的降温作用。由表 4 可知,日均降温率依次为:乔-灌-草型>乔-草型>草坪型。通过多重比较分析发现,乔-灌-草型和乔-草型的空气温度日变幅显著低于草坪型和对照点($P < 0.05$)。由于植物群落的降温效果与叶面积指数呈正相

关^[25-26],而乔木的叶面积指数明显高于灌木和草本,因此有乔木层的植物配植类型绿地蒸腾作用和遮荫效果较明显,降温效果也较显著。这与林荫等^[27]、刘娇妹等^[28]研究结果一致。乔-灌-草型的降温率显著大于乔-草型则可能是由于乔-灌-草型的相对湿度更大,水的比热容较大,温度变化比较慢。

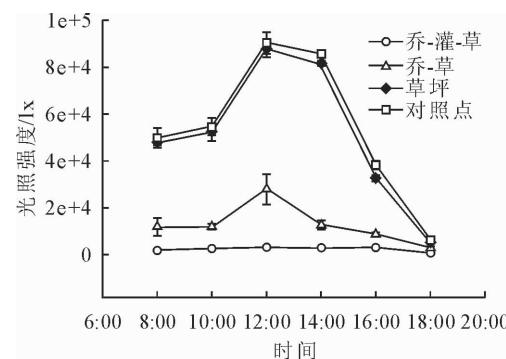


图 2 不同植物配植类型绿地光照强度日变化

Fig. 2 Daily variation of light intensity in different plant arrangement types of green spaces

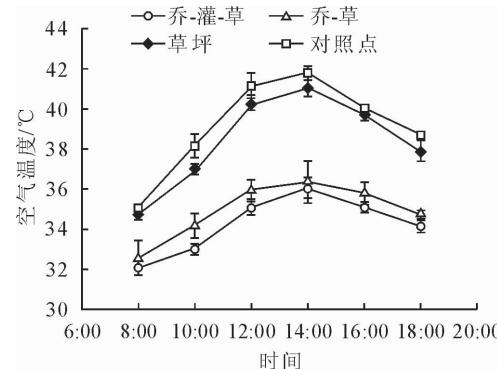


图 3 不同植物配植类型绿地空气温度日变化

Fig. 3 Daily variation of air temperature in different plant arrangement types of green spaces

2.3 不同植物配植类型绿地的相对湿度变化

3 种不同植物配植类型绿地和对照点的相对湿度均呈现先下降后上升的趋势(图 4)。不同绿地的相对湿度最高值都出现在 8:00,而 14:00 为 1 d 中最低值。这可能是由于夜晚植物进行光合作用和蒸腾作用释放了水分子,而早晨气温较低,水汽蒸发上升较慢;中午前后植物叶片气孔关闭,光合作用和蒸腾作用停止,加上温度较高,湿度降到了最低点。从表 5 可以看出,不同绿地的日均增湿率依次为:乔-灌-草型>乔-草型>草坪型。通过多重比较分析发现,乔-灌-草型和乔-草型的日均增湿率显著大于草

坪型($P<0.05$)。这可能是由于乔-灌-草型和乔-草型的叶面积指数较高,植物蒸腾作用更强。再者,植物冠层交错叠加时,空间冠层结构内水分和热量乱流交换增强,土壤和植被蒸散出的水汽不易扩散,湿度会更大。乔-灌-草型的日均相对湿度比乔-草型更大,可能是由于植物种植密度较大,植物冠层结构更复杂,因此水汽更易被滞留。

表4 不同植物配植类型绿地空气温度比较

Table 4 Comparison of air temperature in different plant arrangement types of green spaces

配植类型	空气温度		
	X/℃	α/℃	β/%
乔-灌-草型	34.2±0.2d	4.0±0.3b	12.5±0.6a
乔-草型	34.9±0.4c	3.9±1.2b	10.8±1.1b
草坪型	38.5±0.1b	6.4±0.6a	1.7±0.3c
对照点	39.2±0a	6.8±0.5a	/

表5 不同植物配植类型绿地相对湿度比较

Table 5 Comparison of relative humidity in different plant arrangement types of green spaces

配植类型	相对湿度		
	X/%	α/%	β/%
乔-灌-草型	51.5±1.1a	24.9±1.9a	33.5±2.8a
乔-草型	48.7±1.3a	21.1±3.0a	26.1±3.3a
草坪型	42.4±1.4b	25.3±3.1a	9.7±3.6b
对照点	38.6±1.4c	21.4±4.3a	/

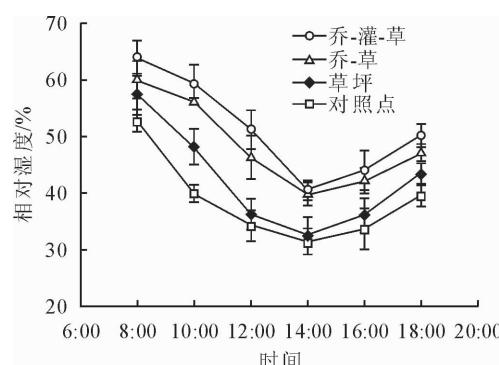


图4 不同植物配植类型绿地相对湿度日变化

Fig. 4 Daily variation of relative humidity in different plant arrangement types of green spaces

表6 不同植物配植类型绿地不舒适指数比较

Table 6 Comparison of discomfort index in different plant arrangement types of green spaces

配植类型	不舒适指数				
	X	Max	Min	α	β/%
乔-灌-草型	28.9±0.3c	29.6	28.6	1.2±0.3b	5.9±0.9a
乔-草型	29.1±0.3b	29.6	28.5	1.1±0.4b	5.3±0.9a
草坪型	30.8±0.2a	31.3	30.0	1.7±0.2ab	-0.1±0.8b
对照点	30.7±0.2a	31.5	29.7	2.1±0.4a	/

地的不舒适指数基本呈现先上升后下降的趋势,草坪型和对照点都在12:00—14:00达到峰值,而乔-

2.4 不同植物配植类型绿地的人体舒适度评价

由表6可知,乔-灌-草型和乔-草型绿地日均降低不舒适指数率分别为5.9%和5.3%,多重比较分析发现,相较于草坪,乔-灌-草型和乔-草型绿地显著降低了不舒适指数($P<0.05$),即这2种类型的绿地明显提高了人体舒适度。草坪虽然有一定的降温增湿作用,但其降低不舒适指数率是负值,可能是因为当气温较高时,湿度增加会加剧人体对热的感觉^[29]。乔-灌-草型和乔-草型绿地日变幅显著小于对照点,可能是由于它们的降温和增湿共同作用的结果。由图5可见,在8:00后不舒适指数持续上升,12:00达到顶峰,12:00之后乔-灌-草型和乔-草型的不舒适指数由于降温增湿作用明显下降,而草坪和对照点的数值基本不变,14:00后才开始下降。对照表2,10:00—14:00在任何一个绿地环境下人均会感到极不舒服。在8:00—10:00和14:00—18:00,人们可选择在乔-灌-草型和乔-草型的植物配植类型绿地中进行户外活动。

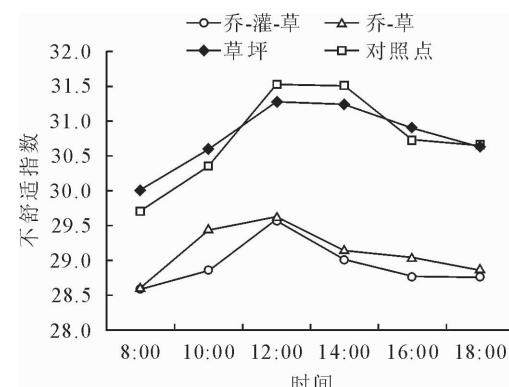


图5 不同植物配植类型绿地不舒适指数日变化

Fig. 5 Daily variation of discomfort index in different plant arrangement types of green spaces

3 结论与讨论

研究表明,在8:00—18:00,不同植物配植类型绿地的空气温度随时间均呈现先上升后下降的“单峰型”变化趋势,而相对湿度呈现出先下降后上升的趋势,且两者都在14:00达到峰值(谷值)。不同绿

灌-草型和乔-草型绿地在12:00达到最大值,这种变化可能是光照强度、植物蒸腾作用和遮荫效果等

因素共同作用的结果。不同植物配植类型绿地都有一定的降温增湿效果,且降温增湿效应和人体舒适度排序均为乔-灌-草型>乔-草型>草坪型,这与任斌斌等^[30]的研究结果相似。另外,乔-灌-草型与乔-草型绿地相比,显著降低了空气温度、提高了人体舒适度,但并没有显著增加相对湿度,这可能与所选地的植物群落结构特征指标及天气条件(晴朗、无风)有关。

在城市公园建设中,风景园林设计师应考虑植物配植类型的多样性与稳定性,适当增加乔-灌-草和乔-草类型的绿地,减少草坪型绿地,提高夏季城市公园绿地的人体舒适度。而根据人体不舒适指数的数据分析得出,8:00—18:00 公园内游人户外活动时都应选择在有乔木覆盖的区域,且应尽量避免10:00—14:00 外出。此外,本试验只考虑了夏季典型日 8:00—18:00 的温湿效应,而除了光照强度、空气温度、相对湿度以外,还有负氧离子、气压等与人体健康息息相关的气象因子^[31-32]。在未来可对全年时段、全天时段、更多测量因子等开展深入、系统研究,为今后城市绿地建设提供更科学合理的建议。

参考文献:

- [1] 杨艳,肖斌.西安长乐公园植物景观现状与景观改造对策[J].西北林学院学报,2010,25(4):209-213.
YANG Y, XIAO B. Status quo and reconstruction scheme of the plant landscape of Changle Park in Xi'an[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(4): 209-213. (in Chinese)
- [2] 高玉福,荣立苹.城市公共绿地降温增湿效益研究综述[J].浙江林业科技,2017,37(3):72-78.
- [3] 玄明君,王鼎震,孙彦坤.哈尔滨市郊八月不同下垫面人体舒适度指数日变化特征[J].东北农业大学学报,2011,42(5):104-109.
XUAN M J, WANG D Z, SUN Y K. Human comfort degree index diurnal variation characters in different underlying surfaces in Harbin suburb in August[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2011, 42(5): 104-109. (in Chinese)
- [4] 杜万光,王成,王茜,等.北京香山公园主要植被类型的夏季环境效应评价[J].林业科学,2018,54(4):155-164.
DU W G, WANG C, WANG Q, et al. Evaluation of summer environmental effects of the main vegetation types in Beijing fragrant hills park[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(4): 155-164. (in Chinese)
- [5] 秦俊,王丽勉,胡永红,等.上海居住区植物群落的降温增湿效应[J].生态与农村环境学报,2009,25(1):92-95.
- [6] 闫淑君,蔡园园,陈莹,等.亚热带城市河岸绿带宽度的温湿效应[J].东北林业大学学报,2013,41(11):36-40.
YAN S J, CAI Y Y, CHEN Y, et al. Effects of different widths of riparian greenbelt on temperature and relative humidity in subtropical urban[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013, 41(11): 36-40. (in Chinese)
- [7] SHASHUA-BAR L, HOFFMAN M E. Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: an empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees[J]. Energy and Buildings, 2000, 31: 221-235.
- [8] HAMADA S, OHTA T. Seasonal variations in the cooling effect of urban green areas on surrounding urban areas[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2010, 9: 15-24.
- [9] 秦仲,李湛东,成仿云,等.夏季栾树群落冠层结构对其环境温湿度的调节作用[J].应用生态学报,2015,26(6):1634-1640.
QIN Z, LI Z D, CHENG F Y, et al. Impact of canopy structural characteristics on inner air temperature and relative humidity of *Koelreuteria paniculata* community in summer[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(6): 1634-1640. (in Chinese)
- [10] PETERS EMILY B., MCFADDEN JOSEPH P. Influence of seasonality and vegetation type on suburban microclimates [J]. Urban Ecosystems, 2010, 13: 443-460.
- [11] QIN Z, LI Z D, CHENG F Y, et al. Influence of canopy structural characteristics on cooling and humidifying effects of *Populus tomentosa* community on calm sunny summer days [J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 127: 75-82.
- [12] 晏海,王雪,董丽.华北树木群落夏季微气候特征及其对人体舒适度的影响[J].北京林业大学学报,2012,34(5):57-63.
YAN H, WANG X, DONG L. Microclimatic characteristics and human comfort conditions of tree communities in northern China during summer[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(5): 57-63. (in Chinese)
- [13] 秦仲,李湛东,成仿云,等.北京园林绿地 5 种植物群落夏季降温增湿作用[J].林业科学,2016,52(1):37-47.
QIN Z, LI Z D, CHENG F Y, et al. Cooling and humidifying effects of five landscape plant communities on summer days in Beijing[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52 (1): 37-47. (in Chinese)
- [14] HUANG L M, LI J L, ZHAO D H, et al. A fieldwork study on the diurnal changes of urban microclimate in four types of ground cover and urban heat island of Nanjing, China[J]. Building and Environment, 2008, 43: 7-17.
- [15] 吴菲,李树华,刘娇妹.城市绿地面积与温湿效益之间关系的研究[J].中国园林,2007(6):71-74.
- [16] 康博文,王得祥,刘建军,等.城市不同绿地类型降温增湿效应的研究[J].西北林学院学报,2005,20(2):54-56.
KANG B W, WANG D X, LIU J J, et al. The effects of reducing temperature and increasing humidity by different greenland in urban area[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2005, 20(2): 54-56. (in Chinese)
- [17] 吴菲,朱春阳,李树华.北京市 6 种下垫面不同季节温湿度变化特征[J].西北林学院学报,2013,28(1):207-213.
WU F, ZHU C Y, LI S H. Seasonal changes of temperature and humidity of six urban underlying surfaces in Beijing[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(1): 207-213. (in Chinese)
- [18] 李晓春,赵丹,任坤,等.不同季节城市绿地温湿效应分析[J].中国人口·资源与环境,2014,24(11):117-120.
- [19] 杜万光,王成,包红光,等.夏季典型天气下公园绿地小气候环

- 境及对人体舒适度的影响[J].生态与农村环境学报,2017,33(4):349-356.
- [20] 冯悦怡,李恩敬,张力小.校园绿地夏季小气候效应分析[J].北京大学学报:自然科学版,2014,50(5):812-818.
FENG Y Y, LI E J, ZHANG L X. Microclimate effects of campus green space in summer[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2014, 50(5): 812-818. (in Chinese)
- [21] 朱思媛,晏海,邵锋,等.杭州城北体育公园夏季小气候温湿效应研究[J].风景园林,2018,25(5):110-114.
- [22] THOM E C. The discomfort index[J]. Weatherwise, 1959, 12:57-61.
- [23] ZHANG L, ZHAN Q M, LAN Y L. Effects of the tree distribution and species on outdoor environment conditions in a hot summer and cold winter zone:a case study in Wuhan residential quarters[J]. Building and Environment, 2018, 130:27-39.
- [24] 王纪来.城市园林绿地植物群落夏季温湿效应研究[D].重庆:西南大学,2012.
- [25] MORAKINYO T E, KONG L, LAU K L, et al. A study on the impact of shadow-cast and tree species on in-canyon and neighborhood's thermal comfort[J]. Building and Environment, 2017, 115:1-17.
- [26] KONG L, LAU KEVIN K L, YUAN C, et al. Regulation of outdoor thermal comfort by trees in Hong Kong[J]. Sustain-
- able Cities and Society, 2017, 31:12-25.
- [27] 林荫,鲁小珍,张静,等.城市不同绿地结构夏季小气候特征研究[J].浙江林业科技,2013,33(5):25-30.
LIN Y, LU X Z, ZHANG J, et al. Summer microclimatic characteristics of the green space with different structures in Nanjing[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2013, 33(5): 25-30. (in Chinese)
- [28] 刘娇妹,李树华,杨志峰.北京公园绿地夏季温湿效应[J].生态学杂志,2008,27(11):1972-1978.
LIU J M, LI S H, YANG Z F. Temperature and humidity effect of urban green spaces in Beijing in summer[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(11): 1972-1978. (in Chinese)
- [29] 刘梅,于波,姚克敏.人体舒适度研究现状及其开发应用前景[J].气象科技,2002,30(1):11-14.
- [30] 任斌斌,李薇,谢军飞,等.北京居住区绿地规模与结构对环境微气候的影响[J].西北林学院学报,2017,32(6):289-295.
REN B B, LI W, XIE J F, et al. Effects of residential green spaces with different scales and structures on micro climatic environment in Beijing[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(6): 289-295. (in Chinese)
- [31] 林金明,宋冠群,赵利霞.环境、健康与负氧离子[M].北京:化学工业出版社,2007.
- [32] 丛喜东,赵邵松,刘学,等.一种林副特产原料生产环境因子监测站系统设计[J].森林工程,2018,34(3):63-68.

(上接第190页)

- [5] OLLI N, EIJA H, SAKARI T, et al. Individual tree detection and classification with UAV-based photogrammetric point clouds and hyperspectral imaging[J]. Remote Sensing, 2017, 9(3):185.
- [6] TUOMINEN S, NÄSI R, HONKAVAARA E, et al. Tree species recognition in species rich area using UAV-borne hyperspectral imagery and stereo-photogrammetric point cloud[J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-3/W3, 2017:185-194.
- [7] LU B, HE Y. Species classification using unmanned aerial vehicle (UAV)-acquired high spatial resolution imagery in a heterogeneous grassland[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 128:73-85.
- [8] SANKEY T T, MCVAY J, SWETNAM T L, et al. UAV hyperspectral and lidar data and their fusion for arid and semi-arid land vegetation monitoring[J]. Remote Sensing in Ecology and Conservation, 2018, 4(1):20-33.
- [9] 段玉婷,王志泰,徐小明,等.石质边坡人工植被群落动态研究[J].西北林学院学报,2016,30(1):75-81.
DUAN Y T, WANG Z T, XU X M, et al. Artificial vegetation community dynamics of rocky slope[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 30(1): 75-81.
- [10] RABER G T, JENSEN J R, SCHILL S R, et al. Creation of digital terrain models using an adaptive lidar vegetation point removal process[J]. Photogrammetric Engineering and Re-
- mote Sensing, 2002, 68(12):1307-1314.
- [11] ZHANG K, CHEN S C, WHITMAN D, et al. A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LiDAR data[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2003, 41(4):872-882.
- [12] CLARK M L, CLARK D B, ROBERTS D A. Small-footprint lidar estimation of sub-canopy elevation and tree height in a tropical rain forest landscape[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 91(1):68-89.
- [13] YOON J S, SHAN J. Urban DEM generation from raw airborne LiDAR data[C]//Proceedings of the Annual ASPRS Conference, Shanghai, 2002:22-26.
- [14] SALLEH M R M, ISMAIL Z, RAHMAN M Z A. Accuracy assessment of lidar-derived digital terrain model (dtm) with different slope and canopy cover in tropical forest region[J]. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2015, 2(2):183.
- [15] BARTIER P M, KELLER C P. Multivariate interpolation to incorporate thematic surface data using inverse distance weighting (IDW) [J]. Computers & Geosciences, 1996, 22(7):795-799.
- [16] CUTLER A, CUTLER D R, STEVENS J R. Random forests [M]. US: Springer, 2012:157-175.
- [17] Breiman L. Bagging predictors[J]. Machine learning, 1996, 24(2):123-140.