



李铭浩,房思悦,林静文,等. 改善热舒适性视角的行道树微气候调节能力研究[J]. 黑龙江农业科学,2023(4):52-58,59.

改善热舒适性视角的行道树微气候调节能力研究

李铭浩,房思悦,林静文,曹钰漩,曹梓俊,黄秋燕,周 璐

(广东理工学院 建设学院,广东 肇庆 526070)

摘要:为了探究行道树的微气候调节能力,以肇庆市城东新区部分城市主干道为研究对象,通过实地调查和观测,统计分析行道树株高、冠高、枝下高等生物学特性,研究其对温度、湿度、太阳辐射强度等微气候的调节作用。并进一步采用 RayMan Pro 3.1 计算出热舒适性指标,以此为依据评价热舒适性,分析行道树与热舒适性的相关性及其对行人热舒适性的影响。结果表明,从改善热舒适性的角度出发,树种间的生物学特性与树木遮荫能力和调节微气候能力密切相关。细叶榕、非洲楝、天桃木、小叶榄仁、菠萝蜜为调节微气候能力良好的树种,树体高大、树冠宽大浓密的行道树能更好发挥遮荫性能并调节道路空间微气候,有效提升行人的热舒适性水平。

关键词:热舒适性;行道树;遮荫;微气候;肇庆

高温导致人们户外活动的舒适性显著降低,空间的利用率也直线下降^[1]。在此背景下,营造一个热舒适性高的空间环境显得格外重要。热舒适度是一种生物气象学指标,是人体对于周围热环境的主观感受的具象表达^[2]。人体热感觉受心理适应和生理调节影响,心理适应性会因人而异,而生理调节主要受环境微气候影响^[3]。在城市开放空间中,相对湿度和温度共同作用,影响人体蒸发散热。当环境炎热且高湿,人体汗液蒸发受到阻碍,热感加剧^[4]。光照度越强,人体皮肤受到的太阳辐射越强,体表温度越高。微气候因子相互影响,共同作用于微气候,影响人的热舒适度。微气候可以理解为一个较小范围内在水平范围 0.1~10.0 km、垂直范围 0~1.0 km、时间范围 24 h 以内的气候,涉及到气候相关的因子,包括温度、湿度、风速、地形、植被、土壤等^[5]。行道树主要通过树叶的遮荫及蒸散作用而明显地改善街道的热舒适性。相关研究发现,单层树木叶片可吸收 80% 的可见光及 20% 的红外光^[6]。遮荫作用不仅能吸收到达地面的可见光与红外光,树冠林荫还能拦截大部分太阳辐射,从而降低树下地面温度与空气温度。行道树还可通过蒸散作用的途径来降低树木周边温度^[7]。树木在吸收大部分太阳辐射后能将显热转化为潜热,将水分气化吸收热量,从而

增加周围的空气湿度,达到降低环境温度的作用,改善城市街道热环境和热舒适性^[8]。

近些年来国内外关于园林植物微气候调节能力的研究已经取得一定成果,例如采用植物群落三维绿量值评价微气候舒适性^[9],树木遮荫可以提高空间的使用效率,能够在时间和空间上增加户外活动的频率等^[10]。但关于行道树调节热舒适性的研究还比较少见,仅有的成果有通过户外热舒适角度评价行道树选择的理论基础^[11],基于生态效益优化的行道树选择应用^[12],关于肇庆市行道树的相关研究还鲜见报道。为进一步探索行道树的遮荫功能及其调节微气候、改善热舒适性的能力,本研究通过对肇庆市城东新区部分道路的实地调研,从微气候角度出发,旨在揭示行道树的微气候调节能力及变化规律,研究不同树种对热舒适性的影响和调节机制,旨在为湿热地区城市行道树景观的营造提供参考。

1 研究地概况

肇庆位于广东省的中西部,是东南沿海的重要交通枢纽,被称为“珠三角的生态屏障”。肇庆属亚热带季风气候,境内受不同季风和高温天气的影响,为园林植物的生长提供了丰富的水热条件,因其物种的多样性和丰富的生物资源,被称为“南亚热带地区的物种宝库”。据相关统计,肇庆市一年中气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的天数达到 285~365 d^[5]。由于雨热同期,太阳辐射相对较强,日照时间较长且平均气温较高、湿度较大等原因(年平均气温 21.2 $^{\circ}\text{C}$,年平均相对湿度 80%,年日照率 39%),导致户外空间的热舒适性体验较差。

收稿日期:2022-11-12

基金项目:广东理工学院大学生创新创业训练计划项目(CXCY2021035)。

第一作者:李铭浩(2001—),女,本科生,专业方向为风景园林。E-mail:2084830566@qq.com。

通信作者:黄秋燕(1985—),女,硕士,讲师,从事风景园林植物应用研究。E-mail:453878697@qq.com。

2 材料与方法

2.1 研究对象

为探究行道树在近似环境下的微气候调节能力,选取广东省肇庆市端州区城东新区的星湖大道、砚都大道、信安大道、端州路、肇庆大道等 5 条道路作为调查研究对象,确定了细叶榕(*Ficus microcarpa*)、香樟(*Cinnamomum camphora*)、人面子(*Dracontomelon duperreanum*)、天桃木(*Mangifera persiciforma*)、银海枣(*Phoenix sylvestris*)、秋枫(*Bischofia javanica*)等应用频率较高、生长良好的行道树为观测研究对象(表 1)。现场观测时间为 2022 年 7 月—8 月。选择的样株生长良好,无明显病虫害侵扰,近期未受到台风、高温等自然灾害或过度修剪等人为措施的影响;种植年限已超过 3 年,胸径 ≥ 20 cm 且误差不超过 5 cm,冠层枝叶相对浓密,具备一定遮荫功能;样株所处位置便于实测数据的准确获取,且其他外界因素的干扰几乎不影响实验结论^[11]。测点设置于树荫下距离地面高度 1.5 m 处,对照点选择在树木荫影范围之外 1.5 m 的人行道范围之内、空旷且无其他外界干扰^[13];此外,测量点和对照点均距离地面 1.5 m,且两者范围之内道路的下垫面材料需一致,避免由于地面材料热辐射差异所造成的误差。

表 1 行道树树种统计

观测地点	植物名称	拉丁学名
肇庆大道	细叶榕	<i>Ficus microcarpa</i>
	香樟	<i>Cinnamomum camphora</i>
	人面子	<i>Dracontomelon duperreanum</i>
砚都大道	细叶榕	<i>Ficus microcarpa</i>
	面包树	<i>Artocarpus incisa</i>
	非洲楝	<i>Khaya senegalensis</i>
	凤凰木	<i>Delonix regia</i>
	波萝蜜	<i>Artocarpus heterophyllus</i>
	天桃木	<i>Mangifera persiciforma</i>
星湖大道	小叶榄仁	<i>Terminalia neotaliala</i>
	天桃木	<i>Mangifera persiciforma</i>
	银海枣	<i>Phoenix sylvestris</i>
	小叶榄仁	<i>Terminalia neotaliala</i>
	秋枫	<i>Bischofia javanica</i>
端州路	高山榕	<i>Ficus altissima</i>
	秋枫	<i>Bischofia javanica</i>
	天竺桂	<i>Cinnamomum japonicum</i>
信安大道	蒲葵	<i>Livistona chinensis</i>
	非洲楝	<i>Khaya senegalensis</i>
	丝葵	<i>Washingtonia filifera</i>
	小叶榄仁	<i>Terminalia neotaliala</i>
	细叶榕	<i>Ficus microcarpa</i>

2.2 试验仪器

试验仪器选择原则是体积相对较小,便于携带,使用简单,测量速度快,数据显示直接,便于快速读取等。根据以往试验观测的经验,采用 SNDWAY SW-50D 激光测距仪[测量精度 $\pm(1.5\text{ mm}+d$ 十万分之五)],*Pro'sKit* MT-4617 series 照度仪(测量精度 $\pm 3\%$)、*Pro'sKit* MT-4616 温度湿度露点测试器(测量精度分别为温度: $\pm 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$;湿度: $\pm 3.0\%$)、哈光测高仪(CGQ-1)、胸径尺(2 m)、卷尺(50 m)等。

2.3 测定项目及方法

测定项目包括行道树的株高、胸径、冠高、枝下高等。采用激光测距仪测量枝下高;采用哈光测高仪(CGQ-1)测量株高;使用胸径尺取离地 1.3 m 的位置测量胸径;冠高由株高减枝下高得出;冠幅采用卷尺或激光测距仪测量;温度、湿度采用温度湿度露点测试器测量读取;太阳辐射强度采用照度仪实测获取数据。在考虑主要微气候因子对人体舒适性的影响的基础上,采用 RayMan Pro3.1 计算生理等效温度(PET),得出各时间段的人体热舒适性指标,并考虑人的活动量、衣服热阻等物理参数对人体热舒适性的影响。录入数据信息包括地理数据(区位中国肇庆,测试点经纬度 $23^{\circ}05'N$, $112^{\circ}48'E$,海拔高度 42 m),气候数据(空气温度、相对湿度、太阳辐射均为实测值,风速设为 $0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,云层覆盖量设为 1),个人数据[设定为身高 165 cm,体重 58 kg,年龄 21 岁,性别为女性(本文侧重行道树热舒适性调节能力分析,因此不考虑该数据的代表性)],衣着数据(夏季服装热阻指数为 0.9,活动量为 80 W)。经过测算得出行道树的热舒适性并分析得到其微气候调节能力。

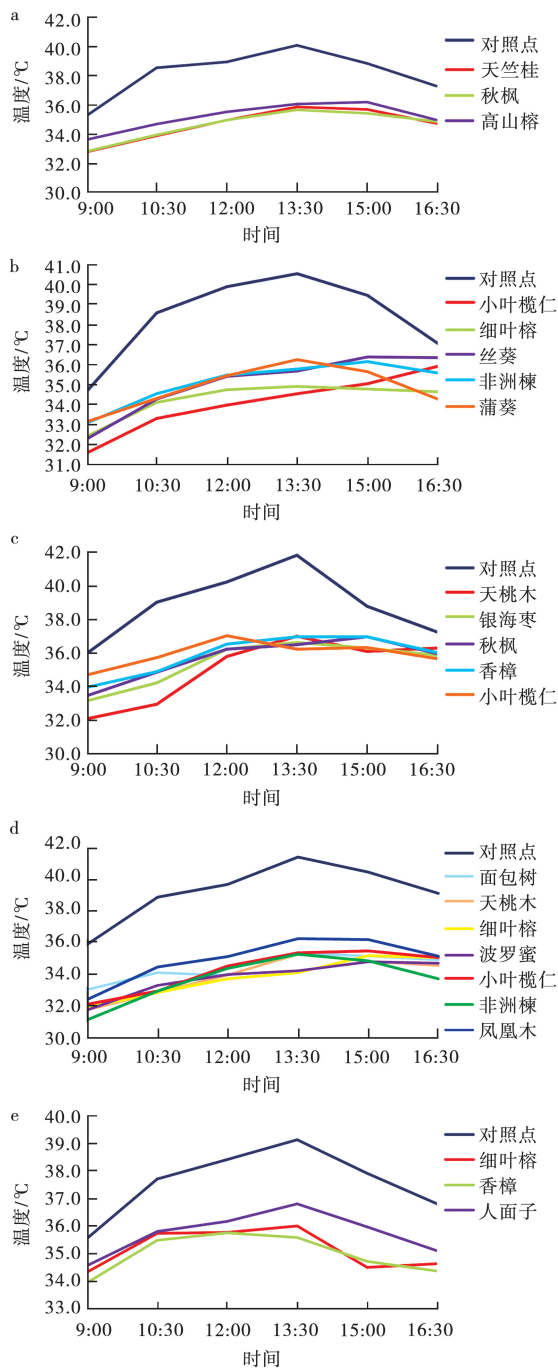
2.4 数据分析

使用 SPSS 22.0 软件对实测的数据和微气候数据进行相关性分析,以生物学特性作为控制变量与微气候因子为因变量研究温度、湿度、太阳辐射强度与冠幅、枝下高、株高、胸径的相关性^[7]。借助于 Origin 2018 和 Excel 2010 进行分析图绘制。

3 结果与分析

3.1 温度

5 条主干道的气温变化趋势均较为一致(图 1),夏季气温上升的阶段为 9:00—13:30(以下简称升温时段),在 13:30 达到峰值,气温下降的阶段为 13:30—16:30(以下简称降温时段)。以下对各条道路行道树的降温能力实测值做详细的解析。



a. 端州路; b. 信安大道; c. 星湖大道; d. 砚都大道;
e. 肇庆大道。

图1 日均温度变化情况

3.1.1 端州路 由图1a可知,在升温时段,降温能力最强的树种是天竺桂和秋枫,最高可降4.6℃,降温能力最弱的是高山榕(3.8℃);在降温时段,降温能力最强的是秋枫,最高可降4.4℃,其次是天竺桂。秋枫降温幅度为2.4~4.5℃,天竺桂为2.3~4.6℃,高山榕为1.8~4.5℃。总体上看,降温能力最强为秋枫,降温能力最弱的为高山榕。

3.1.2 信安大道 由图1b可知,在升温时段,降温能力最强的为小叶榄仁,最高可降温5.9℃,其次为细叶榕,最弱的是蒲葵,最高可降温4.4℃;在降温时段,降温能力最强的为小叶榄仁(6.0℃),其次是细叶榕,最弱的是蒲葵(4.0℃)。小叶榄仁降温幅度为1.1~6.0℃,细叶榕为2.2~5.6℃,丝葵为0.7~4.9℃,非洲楝为1.5~4.8℃,蒲葵为1.5~4.4℃。总体上看,降温能力最强的为小叶榄仁,其次是细叶榕,降温能力最弱的是蒲葵。

3.1.3 星湖大道 由图1c可知,在升温时段,降温能力最强的为天桃木,最高可降6.1℃,其次为银海枣,最弱的是小叶榄仁(3.3℃);在降温时段,降温能力最强的是小叶榄仁,最高可降温5.6℃,其次是秋枫,最弱的是香樟(4.8℃)。天桃木降温幅度为1.0~6.1℃,银海枣为1.4~5.2℃,秋枫为1.3~5.3℃,香樟为1.2~4.8℃,小叶榄仁为1.3~5.6℃。总体上看,降温能力最强的是天桃木,其次是银海枣,降温能力最弱的是小叶榄仁。

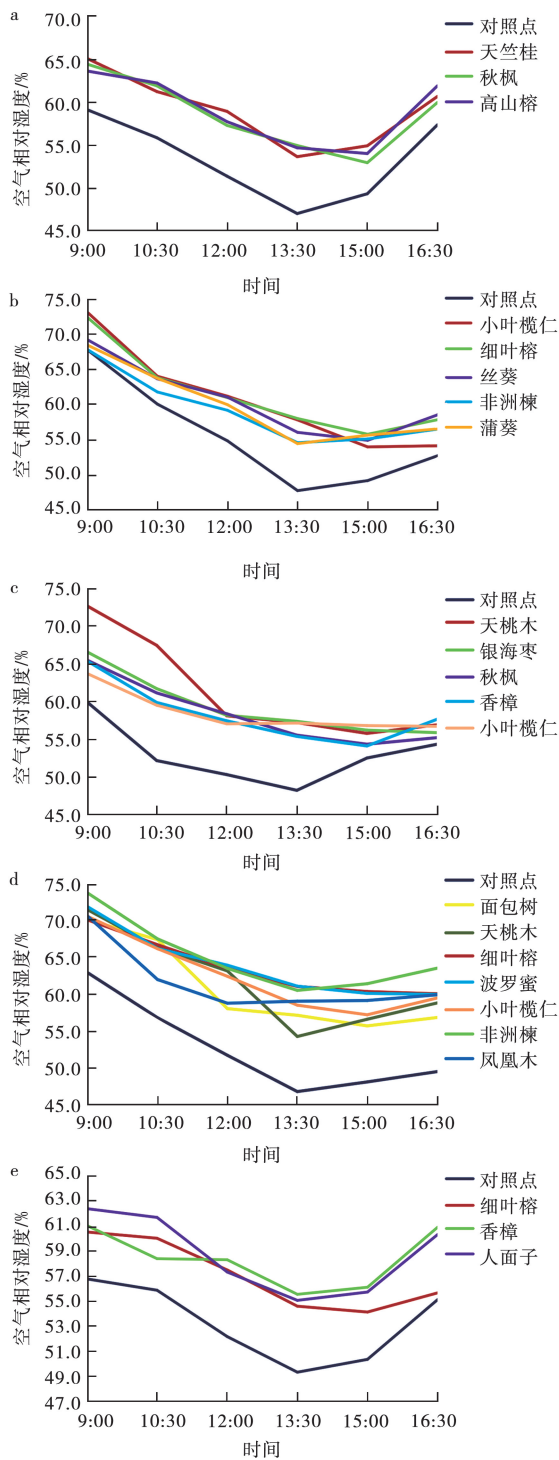
3.1.4 砚都大道 由图1d可知,在升温时段,降温能力最强的为细叶榕,最高可降温6.0℃,其次为天桃木,最弱的是凤凰木(4.6℃);在降温时段,降温能力最强的是细叶榕,可降7.3℃,其次是菠萝蜜,降温能力最弱的为凤凰木(5.2℃)。非洲楝降温幅度为4.8~6.2℃,菠萝蜜为4.1~7.2℃,细叶榕为4.0~7.3℃,天桃木为4.1~6.0℃,小叶榄仁为3.8~6.1℃,面包树为2.9~6.1℃,凤凰木3.5~5.2℃。总体上看,降温能力最强的是非洲楝,其次是菠萝蜜,降温能力最弱的是凤凰木。

3.1.5 肇庆大道 由图1e可知,肇庆大道的气温实测值普遍低于其他路段;在升温时段,降温能力最强的为香樟,最高可降温2.7℃,其次为细叶榕,最弱的是人面子(2.2℃);在降温时段,降温能力最强的仍是香樟,最高可降温3.5℃,其次是细叶榕,降温能力最弱的仍为人面子,最高可降温2.3℃。香樟降温幅度为1.6~3.5℃,细叶榕为1.2~3.4℃,人面子为1.0~2.3℃。总体上看,降温能力最强的是香樟,其次是细叶榕,降温能力最弱的是人面子。以上数值普遍低于其他路段。

3.2 空气相对湿度

根据观测结果可知,不同的道路不同行道树影响下微环境的湿度变化存在差异,但总体变化规律基本相同。9:00空气湿度开始平稳下降,直到13:30,空气湿度开始大幅度上升(图2)。

3.2.1 端州路 由图2a可知,天竺桂日均湿度最高,最高值为65.1%,比对照点高6.0个百分点;日均湿度最低的是秋枫,最低值为52.9%,比对照点高3.6个百分点。增湿能力的强弱顺序为天竺桂>高山榕>秋枫。



a. 端州路; b. 信安大道; c. 星湖大道; d. 砚都大道;
e. 肇庆大道。

图2 日均空气相对湿度变化情况

3.2.2 信安大道 由图 2b 可知,细叶榕的日均湿度最高,最高值为 72.4%,比对照点高 4.6 百分点;日均湿度最低的是非洲楝,最低值为 54.6%,比对照点高 6.8 百分点。增湿能力的强弱顺序为

细叶榕>小叶榄仁>丝葵>蒲葵>非洲楝。

3.2.3 星湖大道 由图 2c 可知,天桃木的日均湿度最高,最高值为 72.7%,比对照点高 19.8 百分点,日均湿度最低的是香樟,最低值为 54.1%,比对照点高 1.6 百分点。行道树增湿能力的强弱顺序为天桃木>银海枣>小叶榄仁>秋枫和香樟。

3.2.4 砚都大道 由图 2d 可知,非洲楝的日均湿度最高,最高值为 73.7%,比对照点高 10.8 百分点,日均湿度最低的是天桃木,最低值为 54.3%,比对照点高 7.4 百分点。增湿能力的强弱顺序为非洲楝>菠萝蜜>细叶榕>小叶榄仁>天桃木>凤凰木>面包树。

3.2.5 肇庆大道 由图 2e 可知,人面子的日均湿度最高,最高值为 62.4%,比对照点高 4.7 百分点,日均湿度最低的是细叶榕,最低值为 54.1%,比对照点高 6.8 百分点。增湿能力的强弱顺序为细叶榕>人面子>香樟。以上数值普遍低于其他路段。

3.3 太阳辐射强度

对比各条道路不同行道树荫影内外太阳辐射的变化情况可以看出,在 10:30—13:30 时段太阳辐射强度达到一天中的最大值(图 3)。

3.3.1 端州路 由图 3a 可知,从整体上看,秋枫日均太阳辐射强度削减值平均为 48.85%,天竺桂为 48.02%,高山榕为 37.91%。因此,树冠对太阳辐射的阻隔能力强弱依次为秋枫>天竺桂>高山榕。造成此现象的主要原因是不同的行道树树冠枝叶密度不同,秋枫树叶较大且密,天竺桂叶小而密,高山榕的树叶大而疏透。

3.3.2 信安大道 由图 3b 可知,从整体上看,细叶榕日均太阳辐射强度削减值平均为 50.48%,小叶榄仁为 50.01%,蒲葵为 49.33%,非洲楝为 46.02%,丝葵为 39.77%。因此,太阳辐射减弱能力强弱依次为细叶榕>小叶榄仁>蒲葵>非洲楝>丝葵。

3.3.3 星湖大道 由图 3c 可知,从整体上看,天桃木日均太阳辐射强度削减值平均为 59.67%,小叶榄仁为 51.89%,银海枣为 51.02%,秋枫为 49.13%,香樟为 43.35%。因此,太阳辐射减弱能力强弱依次为天桃木>小叶榄仁>银海枣>秋枫>香樟。

3.3.4 砚都大道 由图 3d 可知,从整体上看,细叶榕日均太阳辐射强度减弱值平均为 59.67%,天桃木为 61.13%,小叶榄仁为 58.61%,面包树为 53.40%,菠萝蜜为 52.93%,非洲楝为 49.88%,凤凰木为 43.41%。因此,太阳辐射减弱能力强弱依次为细叶榕>天桃木>小叶榄仁>面包树>菠萝蜜>非洲楝>凤凰木。

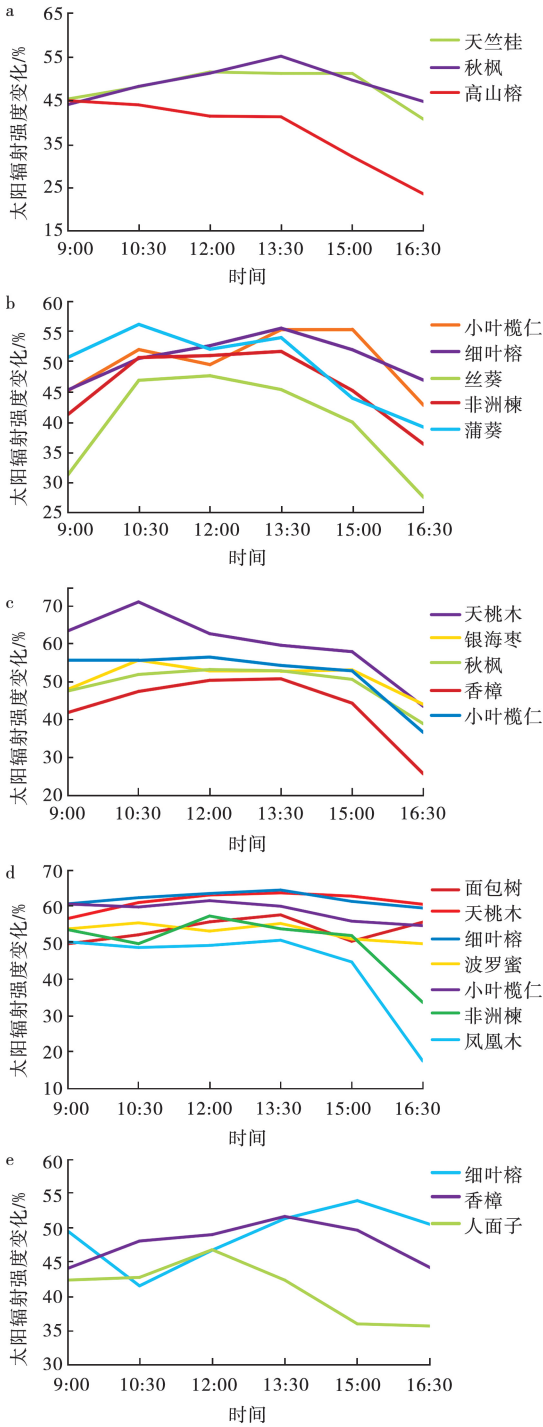


图 3 日均太阳辐射强度变化情况

3.3.5 肇庆大道 由图 3e 可知,细叶榕日均太阳辐射强度减弱值平均为 48.90%,香樟为 47.72%,人面子为 40.96%。因此,树冠对太阳辐射的阻隔能力强弱依次为细叶榕>香樟>人面子。

3.4 热舒适性

利用生理等效温度以客观评价热舒适性(表 2)。
3.4.1 端州路 秋枫的 PET 日均值最佳,为 35.2℃,热舒适性最优,最高可降低 4.5℃,最低可降低 2.4℃,其次为天竺桂,高山榕日均热舒适性值最差,为 35.8℃,PET 值最高可达 36.8℃。综合来看,因此,热舒适性的调节能力由强到弱依次为秋枫>天竺桂>高山榕。

3.4.2 信安大道 小叶榄仁的 PET 日均值最佳,为 34.6℃,热舒适性最优,降温幅度 1.1~6.1℃,其次为细叶榕、蒲葵、非洲楝,丝葵日均热舒适性值最差,日 PET 值最高可达 37℃。因此,热舒适性的调节能力由强到弱依次为小叶榄仁>细叶榕>蒲葵>非洲楝>丝葵。

表 2 不同树种的生理等效温度调节能力

观测地点	树种名称	PET/℃			
		平均值	最大值	最小值	调节范围
端州路	天竺桂	35.3	36.5	33.3	2.6~4.6
	秋枫	35.2	36.3	33.3	2.4~4.5
	高山榕	35.8	36.8	34.2	1.7~4.1
	对照点	38.8	40.8	35.9	-
信安大道	小叶榄仁	34.6	36.5	32.1	1.1~6.1
	细叶榕	34.9	35.5	33.0	2.2~5.7
	丝葵	35.7	37.0	32.9	0.7~4.9
	非洲楝	35.7	36.7	33.7	1.4~4.8
	蒲葵	35.4	36.8	33.7	1.5~4.6
星湖大道	对照点	39.0	41.2	35.2	-
	天桃木	35.6	37.6	32.7	1.0~6.1
	银海枣	36.0	37.2	33.8	1.4~5.3
	秋枫	36.1	37.6	34.1	1.3~5.4
	香樟	36.5	37.6	34.6	1.3~4.9
砚都大道	小叶榄仁	36.6	37.6	35.3	1.3~5.5
	对照点	39.5	42.5	36.6	-
	面包树	35.0	36.0	33.6	2.9~6.1
	天桃木	34.5	35.9	32.4	4.1~6.2
	细叶榕	34.3	35.8	32.4	4.1~8.0
肇庆大道	波罗蜜	34.4	35.4	32.3	4.2~7.3
	小叶榄仁	34.9	36.1	32.7	3.8~6.1
	非洲楝	34.3	35.9	31.6	4.9~6.3
	凤凰木	35.6	36.9	33.0	3.5~5.2
	对照点	39.9	42.1	36.5	-

3.4.3 星湖大道 天桃木的 PET 日均值最佳,为 35.6℃,热舒适性最优,最高可降低 6.1℃,最低可降低 1.0℃,其次为银海枣、秋枫、香樟,小叶榄仁为日均热舒适性值最差,为 36.6℃,PET 值

最高可达 37.6℃。因此,热舒适性的调节能力由强到弱依次为天桃木>银海枣>秋枫>香樟>小叶榄仁。

3.4.4 砚都大道 细叶榕的 PET 日均值最佳,为 34.3℃,热舒适性最优,降温幅度 4.1~8.0℃,其次为非洲楝、菠萝蜜、天桃木、小叶榄仁、面包树。凤凰木日均热舒适性值最差,为 35.6℃,PET 值最高可达 36.9℃。因此,热舒适性调节能力由强到弱依次为细叶榕>非洲楝>菠萝蜜>天桃木>小叶榄仁>面包树>凤凰木。

3.4.5 肇庆大道 香樟日均 PET 值最佳,为 35.6℃,其对人的热舒适性作用强于细叶榕,对温度的调节范围为 1.6~3.5℃,大于细叶榕的调节能力;人面子日均热舒适性值最差(36.4℃),PET 最高值可达 37.4℃。因此,热舒适性的调节能力由强到弱依次为香樟>细叶榕>人面子。

3.5 微气候因子间相关性

行道树在生物学特性的差异使其在热舒适性调节能力上有高低之分,树种、年龄、形态的不同所达到的调节效果不尽相同。树木生物学特性主要包括株高、胸径、冠高、枝下高和冠幅等。树木主要通过遮荫、通风和增湿的手段改善热舒适性,冠层吸收太阳辐射,降低温度,适当增加湿度。胸

径代表树木的年龄,幼苗的阴影覆盖面积远小于成熟期的树木;株高和枝下高影响荫影长度和通风效果;株高和冠高在一定比值内,树冠越高,阴影面积越大;冠幅大,阴影面积大,可减弱太阳辐射强度,有效降低温度。

由表 3 可知,株高与荫影温度显著负相关,与荫影湿度和荫影太阳辐射强度没有显著关系;胸径与太阳辐射强度显著正相关,与温度、湿度没有显著关系。冠高与温度极显著负相关,与太阳辐射强度呈显著负相关,与湿度极显著正相关。枝下高与温度、太阳辐射强度均呈极显著正相关,与湿度呈极显著负相关。冠幅整体表现为与温度极显著负相关,与太阳辐射强度呈显著负相关,与湿度极显著正相关。因此,冠幅、冠高和枝下高对微气候的影响最显著。温度低、湿度高、太阳辐射强度低的环境热舒适性最佳。因此,热舒适性与冠高和冠幅呈正相关,与枝下高呈负相关,所以热舒适性与枝下高和株高的比值呈负相关。在选择合适的树种时,树体高大、树冠宽大浓密的行道树能使街道绿化更为合理,符合人群的使用需求^[14]。在肇庆等气候湿热的华南地区,利用行道树的形态特性通风和遮荫,可在夏季减少太阳辐射、增加风速,改善热环境^[15]。

表 3 微气候因子间相关性分析

项目	株高	胸径	冠高	枝下高	南北冠幅	东西冠幅
荫影温度	-0.271*	0.001	-0.390**	0.321**	-0.498**	-0.408**
荫影湿度	0.190	-0.022	0.306**	-0.301**	0.391**	0.306**
荫影太阳辐射强度	-0.117	0.224*	-0.239*	0.303**	-0.246*	-0.206

注: ** 和 * 分别表示在置信度(双侧)为 0.01 和 0.05 时,相关性显著。

4 讨论

本研究通过统计分析行道树的生物学特性对环境因子的影响,计算人体热舒适性指标,进而分析不同树种的微气候调节能力,得到的结果与其他研究结果基本相同^[16]。研究结果表明,行道树树冠对太阳辐射的吸收、阻挡和反射是影响行道树遮荫效果的主要原因,体现在对环境热舒适性的改善就是降低环境的温度、减少太阳辐射等。行道树的形态、株高、胸径、冠幅、枝下高等都会影响树木冠层的遮荫与蒸散效率。行道树对热环境的调节作用与其树冠形态和冠幅相关,这决定了冠层对太阳辐射的拦截能力,进而影响行道树的蒸散作用效率^[17]。

除生理等效温度指标外,热舒适性的评价方法还有问卷调查、环境卫生学方法等^[18-19]。在今后应结合多种方法,提高数据的可比性、准确性和普适性。此外,由于不同道路所处的区域小环境不同,行人热舒适性存在差异。本研究在实地观测时对

环境条件作了一定的简化,并未考虑水体、建筑物、道路宽度等周围环境的影响^[20],大面积的水域会对湿度有较大幅度的提升;建筑物较多,投射的阴影能降低太阳辐射强度;宽阔的道路风速更大,接受的太阳辐射更多;在今后开展相关研究时应尽可能全面考虑这些影响因素,也要关注行道树的种植形式和群落效应,考虑到树木可增加气流流通或降低风速等对环境的调节效果^[21]。此外,也要重点关注叶面积指数、树冠形态等因素对行道树热环境的影响以及研究行道树株距对热舒适性的影响等方面^[22],以提高研究结果的准确性和科学性。

5 结论

本研究通过实地调研、观测分析等方法,对肇庆市 5 条道路进行实测,以生物学特性和微气候因子等实地测量数据系统分析不同种类行道树的微气候因子变化规律,运用 RayMan Pro 3.1 模型评价热舒适性,并探讨行道树生物学特性对热舒适性的影响和调节机制,总结各时间段的人体

舒适性指标,研究结果可为营造缓解城市热岛效应的城市道路行道树景观提供一定的参考和借鉴。主要得出如下结论:

(1)细叶榕、非洲楝、天桃木、小叶榄仁、菠萝蜜为调节微气候能力良好的树种。单株行道树非洲楝的降温效果最佳,降温范围为 $4.8\sim 6.2\text{ }^{\circ}\text{C}$;天桃木的增湿效果最佳,日均湿度最高值为 72.7% ;天桃木的太阳辐射强度削减能力最佳,最大可达 71.06% ;在热舒适性调节方面,细叶榕效果最佳,可改善生理等效温度范围约为 $4.1\sim 8.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2)冠幅、冠高和枝下高对微气候的影响最为显著。通过微气候因子相关性数据分析,温度低、湿度高、太阳辐射强度低的环境热分子适性最佳。因此热舒适性与冠高和冠幅呈正相关,与枝下高呈负相关,热舒适性与枝下高和株高的比值呈负相关,与冠高与株高比值呈正相关。在生物学特性上,对比不同树种的生理等效温度以客观评价热舒适性,细叶榕对热环境影响最为显著,丝葵的影响最弱。

(3)在需要良好的降温、增湿、遮荫的道路环境中应选择树体高大、冠大荫浓、枝下高与株高比值小或冠高与株高比值大的行道树,树木的遮荫或通风可以降低局部温度,改善微气候环境,提高人体热舒适性。

参考文献:

- [1] 陈力行. 基于室外热舒适的拉萨市居住区景观要素配置优化设计研究[D]. 成都:西南交通大学,2020:6-8.
- [2] 舒也. 杭州市林荫道热舒适性的研究与应用[D]. 杭州:浙江农林大学,2019.
- [3] 王一,栾沛君. 室外公共空间夏季热舒适性评价研究——以上海当代大中型住宅区为例[J]. 住宅科技,2016,36(11):52-57.
- [4] 杨旭. 太阳辐射影响下西安城市街道热舒适林荫调控类型化研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2018.
- [5] 卫渊. 基于行为活动特征的哈尔滨公园微气候环境热舒适性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.

- [6] 郭晓晖,包志毅,吴凡,等. 基于热环境改善的街道绿化研究进展[C]. 中国风景园林学会2020年会论文集(上册),2020:648-653.
- [7] 樊亚妮,董芦笛. 西安城市街道夏季林荫空间形态与微气候效应研究[J]. 城市建筑,2020,17(36):116-121.
- [8] 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(12):183-191.
- [9] 周鑫鑫,郭超. 城市公园游人行为与植物群落微气候调节效应适应性研究[J]. 绿色科技,2021,23(1):5-8.
- [10] 黄秋燕,杨建欣. 缓解热岛效应的园林树木遮荫设计[J]. 黑龙江农业科学,2022(5):69-73.
- [11] 许敏,洪波,姜润声. 校园行道树对夏季室外行人热舒适的影响研究[J]. 中国园林,2020,36(3):139-144.
- [12] 王巧良,晏海,杨凡,等. 基于生态效益优化的城市行道树选择应用[J]. 北方园艺,2019(21):122-129.
- [13] 黄秋燕. 肇庆市高校校园行道树遮荫功能评价研究[D]. 南宁:广西大学,2022.
- [14] 阎瑾,赵红红. 亚热带地区气候环境特征及城市外部空间设计——以广州珠江新城中央广场规划设计为例[J]. 华中建筑,2005(6):127-130.
- [15] 陈睿智. 城市公园景观要素的微气候相关性分析[J]. 风景园林,2020,27(7):94-99.
- [16] 王金涛,王建兵,王盾,等. 几种行道树对惠州市城市道路微气候的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2019,39(6):52-59.
- [17] 左冰菁,程夕,王齐,等. 行道树调节街道热环境舒适性研究进展[J]. 河南科技学院学报(自然科学版),2020,48(2):44-51.
- [18] 李正泉,肖晶晶,马浩,等. 丽水市生态气候休闲养生适宜性分析[J]. 气象与环境科学,2016,39(3):104-111.
- [19] 黄鹤楼,邹旭恺,丁烨毅,等. 气候变化对宁波四明山人体舒适度的影响[J]. 气候变化研究进展,2020,16(3):316-324.
- [20] 张进,李坤明,赵立华. 湿热地区夏季不同室外空间的主观热舒适评价特点研究[J]. 建筑科学,2019,35(8):18-24.
- [21] 刘正鹏,王燕飞,郑金,等. 基于 ENVI-met 的洛阳道路绿化植被微气候改善研究[J]. 城市建筑,2020,17(10):166-170.
- [22] 袁婷. 城市道路绿化舒适性和观赏性指标的量化研究[D]. 海口:海南大学,2017.

Microclimate Regulation Ability of Street Trees from the Perspective of Improving Thermal Comfort

LI Minghao, FANG Siyue, LIN Jingwen, CAO Yuxuan, CAO Zijun, HUANG Qiuyan, ZHOU Lu
(School of Construction, Guangdong Technology College, Zhaoqing 526070, China)

Abstract: In order to explore the microclimate regulation ability of street trees, with part of urban main roads in Chengdong New District of Zhaoqing City as the research object, the biological characteristics of street tree plant height, crown height and branch height were analyzed, and the regulation effect of temperature, humidity and solar radiation intensity was studied. RayMan Pro 3.1 is further used to calculate the thermal comfort index, based on which the thermal comfort is evaluated, and the correlation between street trees and thermal comfort and its influence on thermal comfort were analyzed. The results showed that the biological characteristics of tree species are closely related to tree shade ability and microclimatic regulation from the perspective of improving thermal comfort. *Ficus microcapa*, *Khaya senegalensis*, *Mangifera persiciforma*, *Terminalia neotaliala* and *Artocarpus heterophyllus* are good species for regulating microclimate. The street trees with tall trees and dense canopy can better play the shade performance and adjust the microclimate of road space, and effectively improve the thermal comfort level of pedestrians.

Keywords: thermal comfort; street trees; shading function; microclimate; Zhaoqing