

冠顶式步道秋季微气候效应研究

——以福州“福道”为例

高仰驰^{1,2}, 余坤勇^{2,3}, 刘艳芬^{1,2}, 杨柳青^{1,2}, 陈凤飞^{1,2}, 刘健^{1,2,3*}

(1. 福建农林大学 园林学院, 福建 福州 350002; 2. 3S 技术与资源优化利用福建省高等学校重点实验室, 福建 福州 350002;
3. 福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002)

摘要:以国内首条冠顶式步道——福州“福道”为对象,比较分析了线性栈道、观景平台、休憩平台中 5 种不同空间下 10 个测点的秋季微气候变化特征,并采用舒适指数来评价不同空间对人体热舒适度的影响。结果表明,“福道”整体微气候效应好于裸露的水泥地面,各测点日均降温强度为 0.5℃~4℃,日均增湿强度为 1.5%~9%,步道中两侧有树、单侧有树、观景平台 2 的舒适度效果最佳,日均舒适度值均处于 17.0~25.4,人体感觉“舒适”;观景平台 1、休憩平台类与两侧无树类舒适度效果差,日均舒适度值处于 25.5~27.5,人体感觉“热”,秋季 1 d 中最适合在步道中进行活动的时间段为 8:00—10:00,该时间段内在各类空间中人体均感觉“舒适”,最后针对研究结果与各类测点存在的问题,提出优化策略,以期为冠顶式步道的建设做出一些有益的尝试。

关键词:微气候效应;冠顶式步道;人体舒适度;福道

中图分类号:S731.2

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2021)01-0266-07

Autumn Microclimate Effect of Canopy Trail——A Case Study of ‘Fu Forest Trail’ in Fuzhou

GAO Yang-chi^{1,2}, YU Kun-yong^{2,3}, LIU Yan-fen^{1,2}, YANG Liu-qing^{1,2}, CHEN Feng-fei^{1,2}, LIU Jian^{1,2,3*}

(1. College of Landscape Architecture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China;

2. University Key Laboratory for Geomatics Technology & Optimization Resources Utilization in Fujian Province,

Fuzhou 350002, Fujian, China; 3. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China)

Abstract: The terrtop walk is a barrier-free passage through the urban forest canopy, and users can walk freely in it to enjoy a unique recreational experience. Taking the first terrtop walk in China, Fuzhou ‘fu forest trail’ as the research object, this paper compared and analyzed the characteristics of autumn microclimate changes at 10 measurement points in 5 different spaces in a linear boardwalk, viewing platform, and recreation platform. The comfort index was used to evaluate the effects of different spaces on human thermal comfort. The results showed that the overall microclimate effect of the trail was better than that of bare concrete ground. The daily average temperature drop intensity of each measuring point was 0.5—4℃, and the average daily humidification intensity was 1.5%—9%. The best comfort effects were found in the trail sections with trees in one side or two sides, and in viewing platform 2, from which the average daily comfort value was in the range of 17.0—25.4, and the human body felt comfortable. The viewing platform 1, the rest recreation platforms and the treeless sides were in the level of comfortable. The mean daily comfort degree in these sites ranged 25.5—27.5, by which the human body felt ‘hot’. The most suitable time period for activities on the trail in the autumn day was 8:00—10:00 in the morning, in which human body felt ‘comfortable’. Finally, according to the research results and the problems of various measurement points, an optimization

收稿日期:2020-03-20 修回日期:2020-09-16

基金项目:福建省高校产学研项目(2019N5012);国家自然科学基金面上项目(31770760);福建农林大学科技创新专项基金(KF2015086, CX2X2018129, CXZX2018131)。

作者简介:高仰驰。研究方向:风景园林规划设计。E-mail:yangchigao@163.com

*通信作者:刘健,教授,博士生导师。研究方向:森林资源与环境监测、风景园林规划设计。E-mail:fjlujian@126.com

strategy was proposed, with a view to making some useful attempts for the construction of the terrtop walk.

Key words: microclimate effect; terrtop walk; human comfort; fu forest trail

随着城市化进程的加快,城市热岛效应显著,高温、高热的户外环境与人们追求健康户外生活的矛盾日益凸显,改善户外热舒适成为城市设计与景观设计的重要内容。“冠顶式步道”(treetop walk, TTW)^[1-2]最早出现在 20 世纪 80 年代后期的欧洲国家,步道通过支撑结构被放置在距离地面 12~40 m 的空中,以便公众可以在绿树成荫的无障碍步道系统之间穿梭。90 年代开始,冠顶式步道从起初的为了满足科学研究活动的需求转变为以满足普通民众的科普体验、健身休闲和景观游憩的需求^[3]。相比于国外,我国冠顶式步道的研究尚处在初始阶段,福州“福道”建于 2016 年,为国内首条冠顶式步道,其设计充分尊重自然地形,使人们能够通行在过往难以接触到的自然环境中^[4]。国内多位学者对福道进行了研究,曾真等^[5]探讨分析了福道游客的游憩动机与行为特征,针对不同人群的人口统计学特征和娱乐行为差异,提出了针对游客的游憩动机和行为特征为导向的城市绿道现状优化策略。许晓玲等^[6]运用模糊评价法对福道游客满意度进行综合评价,得出了风俗特色、建筑小品等 12 个影响游客满意度的显著因子,为福道建设提供科学理论指导及实际建议。林月彬等^[7]运用以“W-F 定律”、GST 法和 AHP 法共同确立的研究方法,对福道的景观环境现状展开研究发现,福道及周边环境优异,能够同时兼顾公众的锻炼需求与休闲游憩需求。以往关于福道的研究,主要集中于对景观环境、游憩体验的评价,近年来许多学者对城市街道、公园、广场等空间的微气候环境进行了研究^[8-10],而冠顶式步道作为新型的城市森林步道,环境特征与其他景观环境有所差别,其良好的微气候环境有益于人体健康,同时也影响了公众的游览意愿。

本研究以福州福道梅峰山地公园段为例,观测福道不同类空间秋季微气候(空气温度、相对湿度、风速、光照强度)的日动态变化特征,同时获取各测点的天空可视因子、盖度与景观特征,采用舒适度评价指标对福道不同类型空间、不同时段进行人体舒适度评价,并分析舒适度与各微气候因子、天空可视因子、冠层覆盖度的相关性,旨在探讨如何使冠顶式步道的微气候环境更加舒适,以期丰富理论研究,为冠顶式步道的建设作出一些有益的尝试。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

福道位于福建省福州市,全线长 19 km,沿线分

布着 10 个标志性的场所入口,东北连接左海环湖栈道,西南连闽江,随着山势环绕了象山、后县山、梅峰山、金牛山等山体脊,贯穿福州 5 大公园,旨在将丘陵地带与森林地区融为一体。福道是福州市首条城市山水生态休闲健身走廊,其主体采用空心钢管桁架组成,步道面板采用间隔<1.5 cm 的格栅板,方便无障碍通行,每隔 500 m 左右设置休息平台或观景平台,休息平台设有座椅与遮阳顶棚,方便游客休息。研究选取位于福道中段的梅峰山地公园段为对象,该区步道长 1.5 km,顺着山势与福道主轴线相连,是福道的重要节点和主要出入口之一。

1.2 研究方法

1.2.1 样点的选择 通过实地考察,本研究按照线性栈道、观景平台、休憩平台对研究区域内的空间进行分类,其中线性栈道包括:两侧有树、两侧无树、单侧有树 3 类。按照该分类,在研究区均匀布设 10 个测点并在研究区外空旷的水泥路面选取 1 个点作为参照点,分析对比福道相同空间类型、不同空间类型的微气候环境特点,各测试点的分布情况及参数见图 1、表 1。

1.2.2 测定时间、内容及方法 试验测定时间为 2019 年 9 月 27—29 日连续 3 d(表 2),天气晴朗、无风(风速<2 m·s⁻¹),每天 8:00—18:00,每隔 2 h 在各样点中心距离地面 1.5 m 处同步测定各观测点的空气温度、相对湿度、风速、光照度,按不同方向重复测定 3 次,实测结果取平均值。测试仪器包括美国手持综合气象站(Kestrel5500)、照度计(TE51339R)。同时获取各测点的天空可视因子与盖度,采用鱼镜头采集各测点顶部遮阴覆盖空间影像图,利用 Photoshop 进行像素化处理,获取测点空间的天空可视因子^[11];各测点盖度的估测由 3 人同时进行,通过去平均值得到最终结果^[12]。

1.2.3 数据处理 降温率、增湿率计算公式^[13]:

$$dT/\% = (Tp - Ta)/Tp \quad (1)$$

$$dRH/\% = (RH_a - RH_p)/RH_p \quad (2)$$

式中, $dT(\%)$ 为降温率; Tp 为对照点温度; Ta 为测点温度; $dRH(\%)$ 为增湿率; RH_a 为测点湿度; RH_p 为参照点湿度;

遮光率计算公式^[14]:

$$dL/\% = (Lp - La)/Lp \quad (3)$$

式中, $dL(\%)$ 为遮光率; Lp 为对照点光照度; La 测点光照度;

本研究采用《人居环境气候舒适度评价》中提出



图 1 各测点的分布情况

Fig. 1 Distribution of each measurement point

表 1 各测点设置情况

Table 1 Setting of each measuring point

编号	测点名称	主要植物组成	平均树高/m	CC/%	SVF/%	空间特征
1	观景平台 1(VP1)	—	—	52.3	59.1	空间三面开敞,周围无乔木
2	两侧无树 1(NT1)	—	—	0	100	线性空间,空间开敞
3	休憩平台 1(LP1)	—	—	59.4	0	空间较封闭,两侧通风构筑物为钢与玻璃材质
4	两侧无树 2(NT2)	—	—	0	100	线性空间,空间开敞
5	两侧有树 1(HT1)	相思树(<i>Acacia confusa</i>) 构树(<i>Broussonetia papyrifera</i>)	3.8	46.8	85.4	线性空间,栈道两侧以相思树为主
6	单侧有树 1(AT1)	樟树(<i>Cinnamomum camphora</i>) 秋枫(<i>Bischofia javanica</i>)	4.1	83.4	9.1	线性空间,靠山体一侧植树
7	休憩平台 2(LP2)	—	—	63.2	0	空间较封闭,两侧通风,构筑物为钢与玻璃材质
8	两侧有树 2(HT2)	芒果树(<i>Mangifera indica</i>) 秋枫 竹子(<i>Bambu soideae</i>)	4.3	56.9	52.1	线性空间,栈道两侧以芒果树为主,空间较密闭
9	单侧有树 2(AT2)	相思树	6.9	88.7	24.9	线性空间,靠山体一侧植树,周围植被形成半围合空间
10	观景平台 2(VP2)	油桐(<i>Vernicia fordii</i>) 相思树	7.0	74.5	35	构筑物为半镂空钢材,空间周围植被茂密

注:CC为冠层盖度,SVF为天空可视因子。

的温湿指数 (THI) 作为评价人体热舒适度主要指标^[15], 计算公式为:

$$I = T - 0.55(1 - RH)(T - 14.5) \quad (4)$$

式中, I 表示温湿指数, T 表示空气温度($^{\circ}\text{C}$), RH 为空气相对湿度(%). 其等级评价标准见表 3。

2 结果与分析

2.1 各测点微气候定量分析

2.1.1 空气温度效应分析 图 2 呈现了各测点的温度日间变化特征。10 个测点及对照点的空气温

度随时间呈现先上升后下降的单峰形变化, 各测点最低温均在 8:00—10:00, 12:00—14:00 各测点均达到全天最高温度。与对照点相对比, 各测点都有一定的降温效应(表 4), 其中 AT 类降温效应最佳, 其日均降温强度为: $1.7^{\circ}\text{C} \sim 3.9^{\circ}\text{C}$, 平均降温率达 9.2%。LP 类降温效应最弱, 其降温强度为: $0.5^{\circ}\text{C} \sim 1.8^{\circ}\text{C}$, 平均降温率达 3.9%。在相同类型测点之间进行比较发现, 各类型测点内部均存在一定差异, 其中差异最大的为 VP1 与 VP2, 日均降温强度平均值相差 1.1°C , 日均降温率相差 2.8%。

表 2 各测试日天气状况

Table 2 Weather conditions on each test day

测试日	最高气温	最低气温	天气状况	风力风向
2019年9月27日	31℃	22℃	晴	东北风2级
2019年9月28日	31℃	23℃	晴	东北风1级
2019年9月29日	31℃	23℃	晴	东北风2级

表 3 人体热舒适度等级评价标准

Table 3 Human thermal comfort level evaluation criteria

舒适度等级	感觉程度	温湿指数	健康人群感觉的描述
1	寒冷	<14.0	感觉很冷,不舒服
2	冷	14.0~16.9	偏冷,较不舒服
3	舒适	17.0~25.4	感觉舒适
4	热	25.5~27.5	有热感,较不舒服
5	闷热	>27.5	闷热难受,不舒服

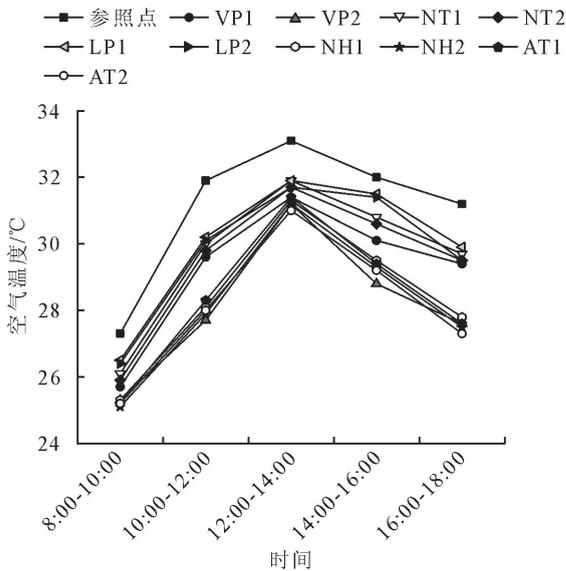


图 2 对照组与各测点空气温度日变化特征

Fig. 2 Diurnal characteristics of air temperature in the control group and various measurement points

2.1.2 相对湿度效应分析 从图 3 可以看出,对照点及不同测点相对湿度的日间动态均呈近“U”形变化,8:00—10:00 相对湿度最高,气温的上升导致相对湿度迅速下降,12:00—14:00 相对湿度降至 1 d 中最低值,随后空气相对湿度呈缓慢上升趋势。与对照点相比各测点都有一定的增湿效应(表 4),HT 和 AT 类日均增湿强度最高,HT 类日均增湿强度为 2.9%~9%,平均增湿率为 11.5%;AT 类日均增湿强度为 3.1%~8.6%,平均增湿率与 AT 类相同;NT 类增湿效应最弱,日均增湿强度为 1.5%~3.5%,平均增湿率为 4.8%。对相同类型的测点进行比较,HT1 与 HT2 差异最大,增湿率相差 1.7%,NT1 与 NT2 差异最小,增湿率相差 0.7%。

2.1.3 光照强度效应分析 从图 4 可以看出,对照点及不同测点的光照强度日动态基本呈单峰分布,日

间光照强度的最高值均出现在 12:00—14:00,该时间段内各测点与对照点光照强度的差值最大,最低值均出现在 16:00—18:00。与对照点相比,除 NT 类其余各测点均有一定的遮荫效果(表 4),其中遮光强度最大的为 VP2,其日均遮光强度为 8 554~53 907 lx,遮光率达 76.8%;遮光效应最弱的为 NT2,其日均遮光强度为 -3 046~-22 596 lx,遮光率达 -45%。在相同类型测点中,VP1 与 VP2 遮光效应差异最大,日均遮光强度相差 14 190 lx,遮光率相差 47.8%,遮光效应差异最小的为 NT 类,日均遮光强度相差 1 518 lx,遮光率相差 2.1%。

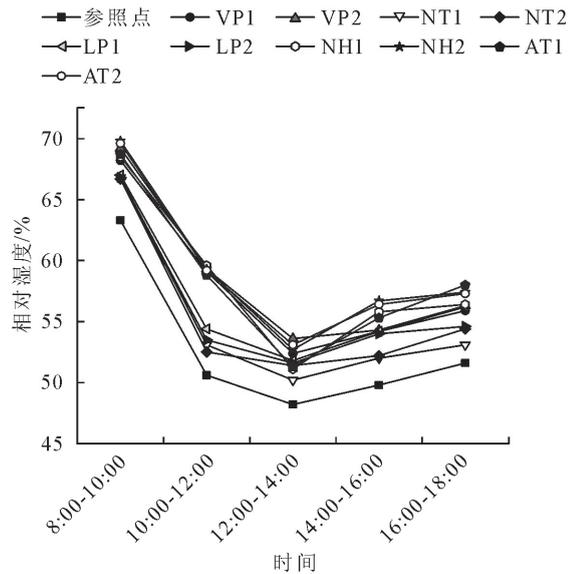


图 3 对照组与各测点相对湿度日变化特征

Fig. 3 Characteristics of daily changes in relative humidity between the control group and each measurement point

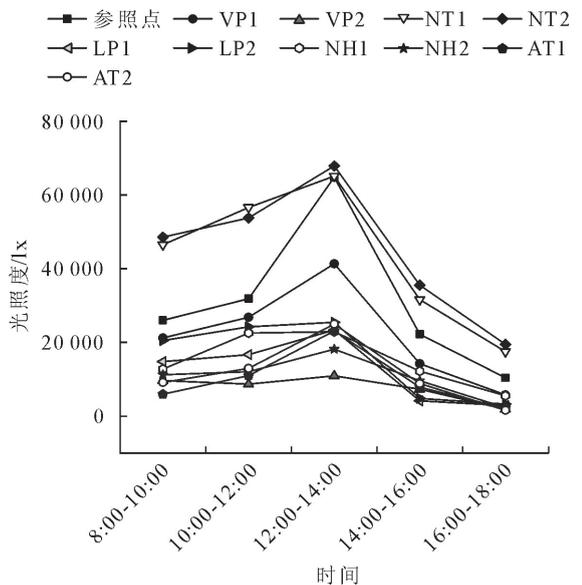


图 4 对照组与各测点光照度日变化特征

Fig. 4 Diurnal characteristics of light intensity in the control group and each measurement point

2.1.4 风速效应分析 从图 5 可以看出,将对照点

与各测点风速日平均值进行比较,各测点风速日动态变化并无明显规律,因此未计算各测点的降风强度与降风率(表4),风速值最高的测点 NT2 与风速值最低的测点 LP2 的日均风速差值达(1.4 m · s⁻¹),测点 NT2、NT1、VP1、AT2 日均风速均高于 RP。HT 与 LP 类测点的遮风效果最明显,NT 类的日均风速最大。对相同类型测点进行内部比较,其中 VP1 与 VP2 两相同类型测点风速日均值相差最大,差值为 1 m · s⁻¹,其余同类型测点内部之间日均风速值几乎无差异。

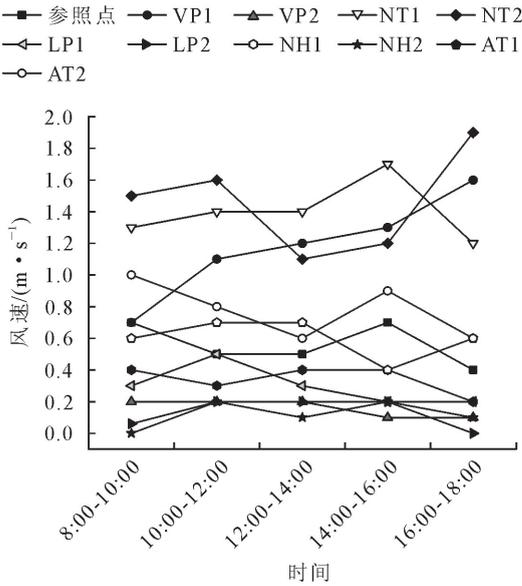


图5 对照组与各测点风速日变化特征

Fig. 5 Characteristics of daily change of wind speed in the control group and each measurement point

2.2 人体舒适度分析

由表5可以看出,8:00—10:00 对照点及各测

点的舒适度指数均在 17~25.4,人体感觉舒适,而 12:00—14:00 对照点及各测点的舒适度指数均 > 25.4,人体有热感,较不舒适,该时间段内有且只有对照点舒适度为 28,高于 27.5,即这个范围内这种环境中人体舒适度感觉为闷热难受,不舒服,从不同测点的不同时刻舒适度指数来看,10 个测点中只有 1 个测点(VP2)在 5 个时间段中有 4 个时间段均保持在舒适状态,另 4 个测点(HT1、HT2、AT1、AT2)只在 3 个时间段内保持舒适状态,其余测点 1 d 中只有 8:00—10:00 处于舒适状态。相比对照点,各测点都能够提高一定的舒适度指数,提高舒适度指数率为 2.6%~7.1%,平均值为 5.1%,其中只有 HT 类、AT 类、VP2 的日均舒适度均在 17~25.4,其人体舒适度感觉为“舒适”,其他测点虽比对照点有增加一定的舒适度但其舒适度范围仍处于 25.5~27.5,人体有热感,较不舒服。

2.3 不同测点微气候因子、结构特征与舒适度的相关性分析

由表6看出,测点内的舒适度与空气温度呈极显著正相关($r=0.886, P<0.01$),与相对湿度($r=-0.875, P<0.01$)呈极显著负相关,与光照度具有极显著正相关关系($r=0.389, P<0.01$),与风速呈相关关系($r=0.149, P=0.279$)。在各测点的结构特征中,舒适度与天空可视因子呈显著关系($r=0.311, P<0.05$),和盖度呈现负显著关系($r=0.343, P<0.05$)。冠顶式步道的光照强度与各测点的结构特征具有极显著的相关性,与天空可视因子($r=0.568, P<0.01$)和盖度($r=-0.693, P<0.01$)分别表现为极显著正相关与极显著负相关。

表4 各测点空气温度、相对湿度、光照度和风速比较

Table 4 Comparison of air temperature, relative humidity, light intensity and wind speed at each measurement point

测点	空气温度/℃				相对湿度/%				光照度/lx				风速/(m · s ⁻¹)			
	<i>x</i>	<i>α</i>	<i>β</i>	<i>γ</i>	<i>x</i>	<i>α</i>	<i>β</i>	<i>γ</i>	<i>x</i>	<i>α</i>	<i>β</i>	<i>γ</i>	<i>x</i>	<i>α</i>	<i>β</i>	<i>γ</i>
VP1	29	31.4	5.7	6.8	58	68.2	15.8	10.1	22 055	41 361	35 551	29	1.2	1.6	0.9	/
NT1	29.7	31.9	5.8	4.5	55	66.8	16.6	4.4	43 470	65 141	47 613	-39.9	1.4	1.7	0.5	/
LP1	30	31.9	5.4	3.5	56.7	67	15.2	7.6	12 386	23 370	20 465	60.1	0.3	0.5	0.3	/
NT2	29.5	31.7	5.8	5.1	55.4	66.7	15.3	5.1	45 061	67 885	48 388	-45	1.5	1.9	0.8	/
HT1	28.4	31.3	6	8.7	58.3	68.5	17.4	10.6	15 189	22 913	17 372	51.1	0.3	0.4	0.2	/
AT1	28.4	31.4	6.2	8.7	58.4	68.7	17.4	10.8	11 021	10 986	8 866	65	0.6	0.7	0.3	/
LP2	29.8	31.7	5.3	4.2	56.1	66.8	15.2	6.5	14 451	25 458	22 155	53.5	0.1	0.2	0.2	/
HT2	28.2	31.2	6.1	9.3	59.2	69.8	17.1	12.3	10 532	18 174	15 871	66.1	0.1	0.2	0.2	/
AT2	28.1	31	5.8	9.6	59.1	69.6	16.5	12.1	11 525	24 999	23 385	62.9	0.8	1	0.4	/
VP2	28.1	31.2	5.9	9.6	58.5	69.2	15.6	11	7 209	10 932	9 049	76.8	0.2	0.2	0.1	/
RP	31.1	33.1	5.8	/	52.7	63.3	15.1	/	31 077	64 839	54 402	/	0.6	0.7	0.3	/

表中,*x* 为均值,*α* 为最大值,*β* 为差值,*γ* 为效应值(降温率、增湿率、遮光率)。

3 结论与讨论

“福道”各测点与对照点相比,都能提高一定的

舒适度指数,说明福道本身对于热舒适度具有一定的调节效果。空气温度与相对湿度是影响其舒适度的重要因素,而不同的冠层结构特征对各微气候因

表 5 不同测点在不同时刻的舒适度指数

Table 5 Comfort index of different measurement points at different moments

测点	8:00—	10:00—	12:00—	14:00—	16:00—
	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00
VP1	23.7	26.2	27	26.2	25.8
NT1	24	26	27.1	26.5	25.7
LP1	24.3	26.3	27.3	27.2	26
NT2	23.8	25.8	27.1	26.4	25.7
HT1	23.4	25.1	26.8	25.9	24.6
AT1	23.4	25.1	26.9	25.7	24.6
LP2	24.2	26.1	27.1	27.1	26.2
HT2	23.3	24.9	26.9	25.8	24.5
AT2	23.4	25	26.7	25.7	24.3
VP2	23.5	24.7	26.9	25.2	24.5
RP	24.9	27.4	28	27.3	26.9

表 6 微气候因子、测点结构特征与 THI 的相关性分析

Table 6 Correlation analysis of microclimate factors, structural features of measurement points and THI

相关项	微气候因子				结构特征	
	空气温度	相对湿度	光照强度	风速	盖度	天空可视因子
舒适度	0.886**	-0.875**	0.389**	0.149	-0.343*	0.311*

注: **表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; *表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

露的水泥地面,由于城市森林具有明显的降温增湿效应^[16-18],冠顶式步道设置于城市森林的上部空间,因此其所处环境因素对微气候效应产生了一定的影响。各测点中,相同时间段内的温湿度、光照度、风速有一定差异,说明各测点微气候变化主要受测试点所处环境差异影响。本研究的 5 种不同类型测点中,HT 与 AT 类的整体降温增湿效应最佳,NT 与 LP 类整体降温增湿效应弱,降温效应差为 1.2℃~1.9℃,增湿效应差为 1.4%~4.4%,这是由于效应佳的测点均被高大的植物围合,而效应弱的测点植被覆盖率低,LP 类虽有构筑物三面围合,但其材质吸热,无法达到降温增湿的效果。NT 类遮光效应弱,平均遮光率达-43%,VP2 遮光效应最佳,平均遮光率达 76.8%,这是由于 VP2 上部有构筑物围合,且四周植物茂密,盖度大,而 NT 类测点四周空旷无遮挡。NT 类风速效应强,LP2 与 HT 类风速效应弱,LP2 在场地盛行风(东北风)面被玻璃遮挡,因此具有很强的防风效应;HT1 在东北、西南处由相思树、构树围合,HT2 的东北、西、南由芒果树及秋风围合,故而风效被大幅削弱。对同类测点比较发现,各测点内部微气候效应存在一定差异,VP 类内部降温、增湿、遮光、风速差异最为明显,VP1 四周无植物围合,构筑仅有遮光作用,较于 VP2 茂密的植物围合,其降温、增湿、遮光效应均更弱;风铃塔处于 VP1 西侧,其他三面开敞,因此场地风速效应强,VP2 北为一处大体量建筑物,西、南、东处被

子起到调节作用。不同类型的测点提高舒适度指数的程度不同,单侧有树类、两侧有树类与观景平台 2 的热舒适度最好,而两侧无树与休憩平台类空间人体舒适较差,经过实地调研了解,福道主要为线性栈道,全程中两侧无树的空间占比最大且休憩平台类型一致,因此可推断,公众秋季在“福道”进行活动时的整体舒适度感觉较差,在现状情况下,建议公众在 8:00—10:00 时在福道进行活动,此时各测点舒适程度最佳。通过对微气候因子、舒适度指数、各测点的结构特征的相关性分析,结果表明它们之间存在显著的相关性。

通过对福道各测点微气候因子日动态测定发现,相比于对照点,8:00—18:00“福道”的空气温度低、相对湿度高,表明福道整体的微气候效应好于裸

植物围合,故风速为稳定偏低值。综上所述,说明植被具有良好的降温增湿、遮阴效应,这个研究结果被国内外不同学者广泛证实^[19-20];场地上各要素的空间布局对风速有重要的影响^[21];测点的结构特征对测点的降温效应具有重要影响,即测点的天空可视因子越小,盖度越大,则测点内的空气温度就越低^[22]。

本研究发现,人体舒适度与空气温度和相对湿度呈极显著相关关系,说明人体舒适度由各测点的空气温度和相对湿度共同影响,这与 M. A. Ruiz *et al*^[23]、刘畅等^[24]的研究结果一致。段玉侠等^[25]研究发现,在半遮荫、无遮荫、全遮荫 3 种类型的空间中,人体舒适度感受为:全遮荫>半遮荫>无遮荫,人体热舒适感受与天空可视因子呈极显著相关,以上研究与本研究的结果大致相同,但本研究中,LP 类测点的舒适度较差,根据相关性分析,人体舒适度与盖度和天空可视因子仅具有显著相关关系,这可能是由于本研究中 LP 类测点顶面为封闭式钢制屋顶,两侧为有机透明玻璃,其天空可视因子值为 0,盖度值偏高,而导致天空可视因子和盖度与舒适度的相关性偏低。温湿指数是由空气温度和相对湿度共同构成的用来描述人体舒适度的综合影响指标,冠层结构通过对各测点微气候因子的调节作用,从而影响了环境舒适度水平^[26]。

通过研究,对“福道”的秋季微气候改善提供以下建议:1)观景平台的选址可选择植物密度较高的场地,周围无景致可观赏的角度可进行植被的栽植;

在现有观景平台中,设置坐凳以让公众驻足赏景的空间,可适当增加遮阳顶棚,营造半围合式空间。2) 休憩平台中道路两侧的玻璃墙面可增加可开合式窗户,增加通风的同时可起到散热作用;在休憩平台内侧顶部可增加降温喷雾,以增强休憩舒适感。增加休憩平台的屋顶绿化,能够有效阻隔太阳辐射对屋面的直接照射,减少辐射热对构筑物内部热环境的影响。3) 线性栈道类:在景致不够美观的路段可采用双侧植树方式,起到遮挡障碍物作用的同时能够增加栈道的舒适度;大多数路段可在靠近山体一侧增加单侧树木的栽植,选择本地树种中冠大荫浓、分枝高的落叶乔木,以保证遮荫与通风;减少对植被的过度修建,保证道路的荫蔽程度;对于周围不易植树且与周围植被冠顶相离较远的路段,适当增加遮阳顶棚。

本研究仅是冠顶式步道微气候效应研究的阶段性成果,仍存在一定欠缺,一方面,对舒适度评价指标的选择仅考虑了温度与湿度 2 个微气候因子,后期研究中可选择更加合理的舒适度评价指标。另一方面,仅对福道中部分段落秋季微气候特征进行了研究,对福道全程及四季的微气候效应研究还有待进一步深入。

参考文献:

- [1] FREEDMAN G. Salcey treetop walk[J]. *Engineering Sustainability*, 2009, 162(4): 215-222.
- [2] 赵晶. 浅谈城市绿道的构建:以新加坡南部山脊为例[J]. *江苏农业科学*, 2012, 40(8): 204-206.
- [3] SCHWARZER M. The tree canopy as blueprint[J]. *Architectural Design*, 2010, 80(3): 20-27.
- [4] 王胤瑜, 黄延峰. 福州“福道”森林步行道设计[J]. *景观设计学*, 2018, 6(6): 67-73, 66.
- [5] 曾真, 朱南燕, 王丹, 等. 基于游客游憩动机及行为特征下的城市绿道优化策略研究——以福州市福道为例[J]. *山东农业大学学报:自然科学版*, 2018, 49(4): 639-645.
- [6] 许晓玲, 朱志鹏, 陈梓茹, 等. 城市森林步道游客综合评价——以福道为例[J]. *西北师范大学学报:自然科学版*, 2018, 54(4): 109-115.
- [7] 林月彬, 刘健, 余坤勇, 等. 冠顶式步道景观环境感知评价研究——以福州“福道”为例[J]. *中国园林*, 2019, 35(6): 72-77.
- [8] 张俊艳, 林高山, 王华静, 等. 城市公园降温效应的季节性差异研究——以石家庄市为例[J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(1): 247-253.
- [9] ZHANG J Y, LIN G S, WANG H J, *et al.* Seasonal differences in the cooling effect of urban parks——a case study of Shijiazhuang[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(1): 247-253. (in Chinese)
- [10] 陈煜. 城市山体绿道微气候特征观测方法研究[J]. *环境科学与管理*, 2019, 44(8): 137-142.
- [11] 王嘉琦, 王睿, 王得祥. 春季不同类型城市滨水绿地的微气候与人体舒适度研究[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(3): 231-236.
- [12] WANG J Q, WANG R, WANG D X. Effects of different urban waterfront green spaces on the microclimate and comfort degree of humanbeing in spring[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(3): 231-236. (in Chinese)
- [13] 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.
- [14] 张军泽, 陈锡云, 岳辉, 等. 不同恢复模式下红壤区森林植被盖度变化的阈值效应分析[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(11): 2403-2414.
- [15] 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.
- [16] 陈耀华. 关于园林树木遮荫效果定量分析方法的探讨[J]. *中国园林*, 1988(2): 61-62, 6.
- [17] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 27963-2011: 人居环境气候舒适度评价[S]. 北京: 气象出版社, 2011.
- [18] MACKEY C W, LEE X, SMITH R B. Remotely sensing the cooling effects of city scale efforts to reduce urba heat island[J]. *Building and Environment*, 2012, 49: 348-358.
- [19] 陈文静, 杨从从. 2001—2017 年青海省 NDVI 时空变化特征及其对气候因子的响应[J]. *森林工程*, 2020, 36(5): 54-61.
- [20] ABREU-HARBICH L V, LABAKI L C, MATZARAKIS A. Effect of tree planting design and tree species on human thermal comfort in the tropics. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 138(6): 99-109.
- [21] YANG A S, JUAN Y H, WEN C Y, *et al.* Numerical simulation of cooling effect of vegetation enhancement in a subtropical urban park[J]. *Applied Energy*, 2017, 192: 178-200.
- [22] 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.
- [23] YAN H, WANG X, DONG L. Microclimatic characteristics and human comfort conditions of tree communities microclimatic characteristics and human comfort conditions of tree communities[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2012, 34(5): 57-63. (in Chinese)
- [24] 熊瑶, 金梦玲. 南京林业大学校园不同类型绿地冬季微气候效应分析[J]. *西北林学院学报*, 2018, 33(1): 281-288.
- [25] XIONG Y, JIN M L. Microclimate effects of different green spaces in winter: a case study of nanjing forestry university-journal of northwest forestry university[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(1): 281-288. (in Chinese)
- [26] 段玉侠. 风景园林空间小气候实测及适应性设计研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018.
- [27] RUIZ M A, CORREA E N. Adaptive model for outdoor thermal comfort assessment in an Oasis city of arid climate[J]. *Building and Environment*, 2015, 85: 40-51.
- [28] 刘畅, 徐宁, 宋靖达, 等. 城市森林公园游人热舒适感受与空间选择[J]. *生态学报*, 2017, 37(10): 3561-3569. , 2017, 37(10): 3561-3569.
- [29] 段玉侠, 金荷仙, 史琰. 风景园林空间冠层遮阴对夏季小气候及人体热舒适度的影响研究——以南京军区杭州疗养院为例[J]. *中国园林*, 2018, 34(5): 64-70.
- [30] SHAHIDAN M F, SHARIFF M K M, JONES P, *et al.* A comparison of *Mesua ferrea* L. and *Hura crepitans* L. for shade creation and radiation modification in improving thermal comfort[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 97(3): 168-181.