

# 上海市苏州河滨水带不同类型绿地和非绿地夏季小气候因子及人体热舒适度分析

薛申亮, 刘滨谊<sup>①</sup>

(同济大学建筑与城市规划学院, 上海 200092)

**摘要:** 对上海市苏州河西岸滨水带不同类型绿地(6个测点)和非绿地(4个测点)测点夏季空气温度、空气相对湿度、太阳辐射和风速4个主要小气候因子的差异进行了比较,并对各测点的人体热舒适度进行了主观和客观评价。结果表明:各测点的空气温度、空气相对湿度、太阳辐射和风速存在明显差异,平均值分别为34.1℃~37.9℃、38.2%~48.4%、138.5~506.7 W·m<sup>-2</sup>和0.0~1.7 km·h<sup>-1</sup>。人体热舒适度的主观评价结果表明受访者普遍认为各测点气温偏高、湿度大、太阳辐射一般、风速小,人体舒适度较差;客观评价结果表明各测点的预测平均投票(PMV)、生理等效温度(PET)和标准有效温度(SET\*)分别为2.9~4.9、35.8℃~50.0℃和26.9℃~38.7℃。在绿地测点中,P3测点(非临水-灌草-半开敞空间)的空气温度平均值最低,P5测点(临水-乔灌草-半围合空间)的空气相对湿度平均值最低,但风速平均值最大,P2测点(临水-乔草-半开敞空间)的太阳辐射平均值及PMV、PET和SET\*值均最低;在非绿地测点中,P10测点(临水-木制硬质铺装-开敞空间)的空气温度平均值、太阳辐射平均值及PMV、PET和SET\*值均最低,P9测点(非临水-板石制硬质铺装-开敞空间)的空气相对湿度平均值最低,P4测点(临水-砖石制硬质铺装-开敞空间)的风速平均值最大。总体而言,与非绿地测点相比,绿地测点的空气温度、太阳辐射及PMV、PET和SET\*值均较低,但风速较高。综上所述,受访者在绿地中的人体热舒适感觉优于非绿地,因此,建议在上海市苏州河滨水带规划设计中优先采用绿地形式,尤其是临水-乔草-半开敞空间和临水-乔灌草-半围合空间的绿地形式。

**关键词:** 滨水带; 绿地; 非绿地; 小气候因子; 人体热舒适度评价

中图分类号: Q948; X321 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2018)02-0108-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2018.02.14

**Analyses on microclimatic factors and human thermal comfort of different types of greenbelt and non-greenbelt in riparian zone of Suzhou River in Shanghai City in summer** XUE Shenliang, LIU Binyi<sup>①</sup> (College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2018, 27(2): 108-116

**Abstract:** Differences in four main microclimatic factors of air temperature, air relative humidity, solar radiation, and wind speed at measuring points of different types of greenbelt (six measuring points) and non-greenbelt (four measuring points) in riparian zone of west bank of Suzhou River in Shanghai City in summer were analyzed, and subjective and objective evaluations of human thermal comfort of each measuring point were conducted. The results show that there are obvious differences in air temperature, air relative humidity, solar radiation, and wind speed of each measuring point with the averages of 34.1℃-37.9℃, 38.2%-48.4%, 138.5-506.7 W·m<sup>-2</sup>, and 0.0-1.7 km·h<sup>-1</sup>, respectively. The result of subjective evaluation of human thermal comfort shows that interviewees generally believe that at each measuring point, air temperature is slightly high, humidity is high, solar radiation is general, wind speed is low, and human comfort is poor. The result of objective evaluation shows that predicted mean

收稿日期: 2017-12-26

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51338007)

作者简介: 薛申亮(1992—),男,江苏启东人,硕士研究生,主要从事园林规划设计方面的研究工作。

<sup>①</sup>通信作者 E-mail: byltjulk@vip.sina.com

vote (PMV), physiological equivalent temperature (PET), and standard effective temperature (SET\*) of each measuring point are 2.9–4.9, 35.8 °C–50.0 °C, and 26.9 °C–38.7 °C, respectively. Among greenbelt measuring points, the average of air temperature is the lowest at P3 measuring point (non by water–shrub–herb–semi-open space); the average of air relative humidity is the lowest at P5 measuring point (by water–arbor–shrub–herb–semi-enclosed space), while the average of its wind speed is the highest; the average of solar radiation, and PMV, PET and SET\* values are all the lowest at P2 measuring point (by water–arbor–herb–semi-open space). Among non-greenbelt measuring points, the averages of air temperature and solar radiation, and PMV, PET and SET\* values are all the lowest at P10 measuring point (by water–rigid pavement of wood–open space); the average of air relative humidity is the lowest at P9 measuring point (non by water–rigid pavement of slabstone–open space); while the average of wind speed is the highest at P4 measuring point (by water–rigid pavement of masonry–open space). In general, compared with non-greenbelt measuring point, air temperature, solar radiation, and PMV, PET and SET\* values in greenbelt measuring point are all lower, but the average of its wind speed is higher. In conclusion, human thermal comfort of interviewees in greenbelt is superior to non-greenbelt, therefore, it is suggested that greenbelt mode should be preferred in planning and designing of riparian zone of Suzhou River in Shanghai City, especially the greenbelt modes of by water–arbor–herb–semi-open space and by water–arbor–shrub–herb–semi-enclosed space.

**Key words:** riparian zone; greenbelt; non-greenbelt; microclimatic factor; human thermal comfort evaluation

城市河道具有降温增湿及缓解市区热岛效应等生态功能和作用<sup>[1–2]</sup>,而城市滨水带绿地紧邻城市河道,扩大了城市河道的生态效应。许多研究结果表明:城市滨水带绿地对小气候变化和人体舒适度作用明显<sup>[3–12]</sup>。滨水带内的绿地面积越大,植被对空气温度和空气相对湿度的改善效果越好<sup>[13]</sup>。不同植物种类和结构布局对空气湿度的影响存在显著差异<sup>[14]</sup>,并且,滨水带的植被覆盖率与水体的降温增湿效应呈正相关<sup>[15]</sup>。另外,植物的消风减噪效果明显<sup>[16]</sup>,并且,不同类型植被在降低风速方面均作用显著<sup>[17]</sup>,对植被空间内的太阳辐射也有显著影响<sup>[18]</sup>。

相关研究表明:空气温度是影响人体热舒适度的一个主要因子,通常人体感到舒适的空气温度为 22 °C ~ 28 °C<sup>[19–24]</sup>;太阳辐射是影响人体热舒适度的另一个主要因子<sup>[25–26]</sup>,通常在树荫下人体的热舒适度较好<sup>[27–29]</sup>。空气湿度直接影响人体的热舒适度,当空气相对湿度为 30% ~ 70% 时,人体的热舒适度适宜,尤其在空气相对湿度 40% ~ 50% 时人体的热舒适度最理想<sup>[30]</sup>。风速也是影响人体热舒适度的重要因子,通常令人舒适的风速应小于 10.8 km · h<sup>-1</sup><sup>[31–32]</sup>。在夏季高温多雨且空气相对湿度高于 70% 的天气条件下,人体的汗液不易蒸发,形成令人不舒适的闷热感,人体热舒适度较差<sup>[33]</sup>。综上所述,根据这些小气候因子可判断人体的热舒适度。

在人体热舒适度评价研究中,多数学者采用主观

评价方式调查户外人群的实际热感觉,主要包括调查问卷和访谈等形式<sup>[34–38]</sup>。按照研究目的,主观评价指标可分为热感觉投票(TSV)、综合热舒适度投票(OSV)、湿度感觉投票(HSV)、风速感觉投票(WSV)、太阳辐射感觉投票(RSV)、热满意度投票(TS)和热期望投票(TP)等,研究者应根据自身的研究目的和意义选取合适的评价指标<sup>[39]</sup>。

目前,关于滨水带不同类型绿地对小气候因子和人体热舒适度影响的研究报道较少<sup>[40–41]</sup>,更缺少综合滨水带绿地、小气候因子和人体热舒适度评价的定量研究。鉴于此,作者对上海市苏州河滨水带不同类型绿地和非绿地测点夏季的空气温度、空气相对湿度、太阳辐射和风速的日变化进行了比较研究,采用问卷调查法对受访者在不同类型绿地和非绿地测点的人体热舒适度进行了主观评价分析,并据此进行了人体热舒适度的客观评价分析,以期明确不同类型绿地对滨水带小气候因子及人体热舒适度的影响,并为滨水带绿地的规划设计提供参考资料。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概况

上海市位于长江和黄浦江的入海口处(地理坐标为北纬 30°40' ~ 31°53'、东经 120°52' ~ 122°12'),为中国东部海岸的中心区和长江三角洲冲积平原入海口处的

重要组成部分,海拔 3.5~4.5 m。该地区属于北亚热带季风气候区,四季分明,日照充足,降水量充沛;夏季高温、多雨、湿热,最高日均温约 32 ℃,极端高温达 40 ℃,空气相对湿度 72%,盛行东南风,平均风速约 12.2 km·h<sup>-1</sup>;冬季阴冷、少雨,最低日均温约 1 ℃,空气相对湿度 66%,盛行西北风,平均风速约 10.8 km·h<sup>-1</sup>。该地区土壤包括水稻土、灰潮土、滨海盐土和黄棕壤<sup>[42]</sup>,地带性植被包括以红楠 (*Machilus thunbergii* Sieb. et Zucc.)、青冈 [*Cyclobalanopsis glauca* (Thunb.) Oerst.] 和苦槠 [*Castanopsis sclerophylla* (Lindl.) Schott.] 等种类为主的常绿阔叶林,以水竹 (*Phyllostachys heteroclada* Oliver) 为主的亚热带竹林,以及沿海滩涂盐生植被等<sup>[43]</sup>。

实验选取上海市普陀区苏州河西岸光复西路滨水带(地理坐标为北纬 31°14'37"、东经 121°25'30")为样段,东西宽 18~20 m,南北长约 426 m,绿化覆盖率约 84%;滨水带的东、西两岸均紧邻高层住宅区,两岸建筑高度分别约 40 和 50 m。该段滨水带依照位置可分为临水(距离苏州河水体 0~5 m 的水陆交界区域)和非临水(距离苏州河水体 5~20 m 的陆地)2 类;依据景观空间可分为半开敞空间(围合性及受外界环境影响均适中,且内部部分空间要素与外界环境共享)、开敞空间(围合性弱,受外界环境影响大,且内部空间要素与外界环境共享)和半围合空间(围合性强,且以自我围合为主,受外界环境影响小)3 类。并且,绿地类型依照植被分为灌草、乔草和乔灌草 3 类,其中,乔木植物种类有香樟 [*Cinnamomum camphora* (Linn.) Presl]、广玉兰 (*Magnolia grandiflora* Linn.)、水杉 (*Metasequoia glyptostroboides* Hu et W. C. Cheng)、垂柳 (*Salix babylonica* Linn.)、榉树 [*Zelkova serrata* (Thunb.) Makino.] 和紫薇 (*Lagerstroemia indica* Linn.) 等,灌木植物种类有红叶石楠 (*Photinia × fraseri* Dress.)、金叶女贞 (*Ligustrum × vicaryi* Hort.)、金边黄杨 (*Euonymus japonicus* var. *aurea-marginatus* Hort.)、八角金盘 [*Fatsia japonica* (Thunb.) Decne. et Planch.] 和海桐 [*Pittosporum tobira* (Thunb.) Ait.] 等,草本植物种类有麦冬 [*Ophiopogon japonicus* (Linn. f.) Ker-Gawl.]、红花酢浆草 (*Oxalis corymbosa* DC.) 和马蹄金 (*Dichondra repens* Forst.) 等;非绿地为人工制成的下垫面(无任何植被),可分为砖石制硬质铺装、板石制硬质铺装和木制硬质铺装 3 类。

## 1.2 研究方法

1.2.1 测点设置 在前述滨水带样段共选择 6 个绿地测点和 4 个非绿地测点。其中,绿地测点分别编号为 P1(非临水-乔草-半开敞空间)、P2(临水-乔草-半开敞空间)、P3(非临水-灌草-半开敞空间)、P5(临水-乔灌草-半围合空间)、P6(临水-灌草-半开敞空间)和 P7(非临水-乔灌草-半围合空间),非绿地测点分别编号为 P4(临水-砖石制硬质铺装-开敞空间)、P8(临水-板石制硬质铺装-开敞空间)、P9(非临水-板石制硬质铺装-开敞空间)和 P10(临水-木制硬质铺装-开敞空间)。

1.2.2 小气候因子测定 于 2017 年 7 月 24 日至 26 日的 7:00 至 18:00,使用 Watchdog 小型气象站对上述 10 个测点的空气温度、空气相对湿度、太阳辐射和风速进行测定,每个测点放置 1 台气象站,安装高度 1.5 m,每隔 10 min 记录 1 次数据。

1.2.3 人体热舒适度调查 对各测点的受访者进行人体热舒适度问卷调查。调查项目包括性别、年龄、身高、体重、着装、运动情况、热感觉投票(TSV)、热舒适度投票(TCV)、热期望投票(TP)、湿度感觉投票(HSV)、太阳辐射感觉投票(RSV)和风速感觉投票(WSV)。其中,TSV 设置非常冷、冷、微冷、凉、不冷不冷、暖、微热、热和非常热 9 级标准;TCV 设置非常不舒适、不舒适、舒适和非常舒适 4 级标准;TP 设置冷一点、不变和热一点 3 级标准;HSV 设置非常干燥、干燥、不干不湿、潮湿和非常潮湿 5 级标准;RSV 设置非常弱、弱、不强不弱、强和非常强 5 级标准;WSV 设置无风、小、不大不小、大和狂风 5 级标准。共发放调查问卷 320 份,收回有效调查问卷 310 份,回收率约 97%。

## 1.3 数据统计和分析

根据各测点上述小气候因子的测定结果及受访者的总体生理指标平均值(结合受访者的性别、年龄、身高、体重、着装和运动情况等信息设定为:男性,45 岁,身高 173 cm,体重 70 kg)、服装热阻 0.9 clo 和平均新陈代谢率 115 W·m<sup>-2</sup>(慢走步行),采用 RayMan 1.2 软件计算各测点的预测平均投票(PMV)、生理等效温度(PET)和标准有效温度(SET\*),参照文献[44-46]对 PMV、PET 和 SET\* 值反映的人体感受进行分析。

采用 EXCEL 2007 和 SPSS 19.0 统计分析软件对相关数据进行整理、归纳和统计分析。

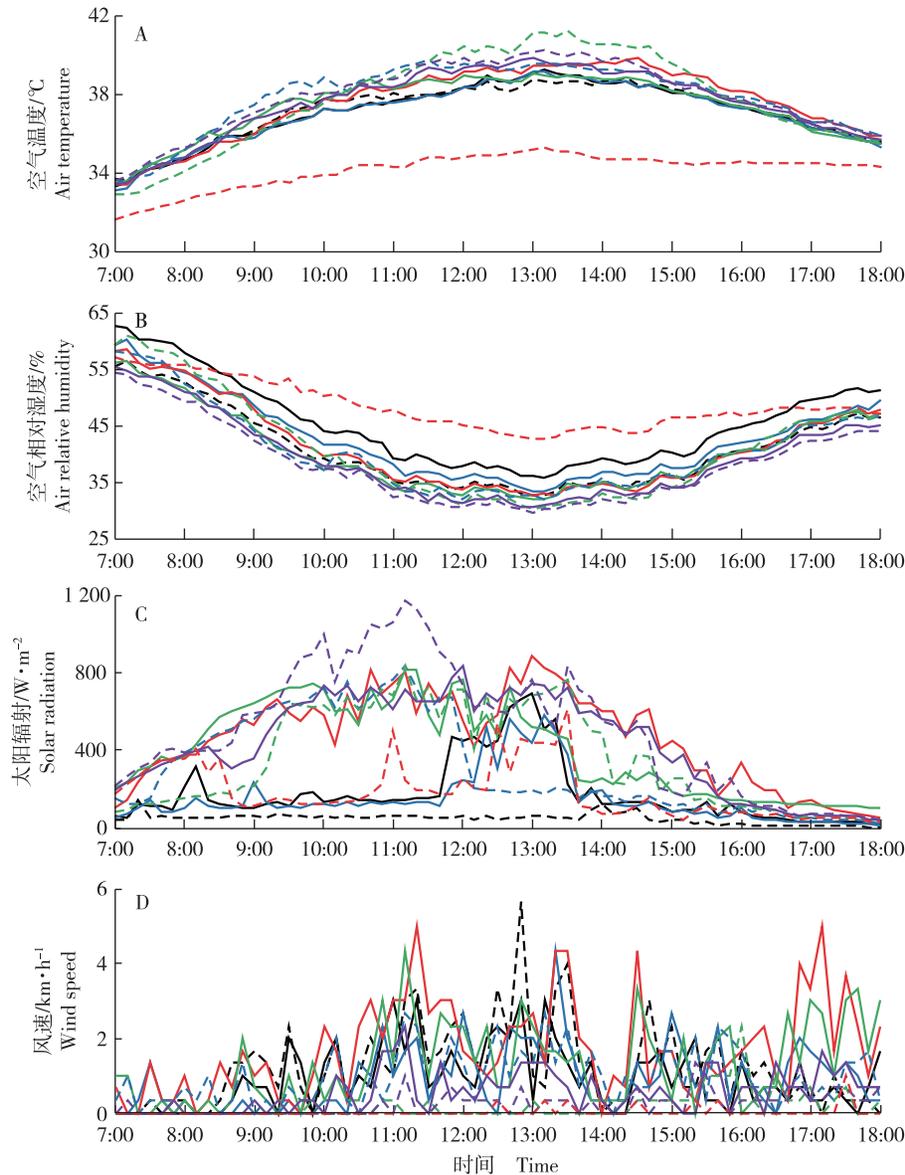
## 2 结果和分析

### 2.1 不同类型绿地和非绿地夏季主要小气候因子比较

上海市苏州河滨水带不同类型绿地和非绿地各

测点夏季的空气温度、空气相对湿度、太阳辐射和风速的日变化见图1,各测点上述小气候因子的最大值、最小值和平均值见表1。

2.1.1 空气温度比较 实验结果(图1-A和表1)表明:各测点空气温度的日变化趋势基本相似,总体上呈先升高后降低的趋势,各测点空气温度的峰值多出



—: P1(NBy-AH-SOS); - - -: P2(By-AH-SOS); —: P3(NBy-SH-SOS); —: P4(By-RPM-OS); —: P5(By-ASH-SES); - - -: P6(By-SH-SOS); - - -: P7(NBy-ASH-SES); —: P8(By-RPS-OS); - - -: P9(NBy-RPS-OS); - - -: P10(By-RPW-OS).

P1,P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8,P9,P10; 测点 Measuring point. NBy: 非临水 Non by water; By: 临水 By water. AH: 乔木 Arbor-herb; SH: 灌木 Shrub-herb; ASH: 乔灌木 Arbor-shrub-herb. SOS: 半开敞空间 Semi-open space; OS: 开敞空间 Open space; SES: 半围合空间 Semi-enclosed space. RPM: 砖石制硬质铺装 Rigid pavement of masonry; RPS: 板石制硬质铺装 Rigid pavement of slabstone; RPW: 木制硬质铺装 Rigid pavement of wood.

图1 上海市苏州河滨水带不同类型绿地和非绿地测点夏季空气温度(A)、空气相对湿度(B)、太阳辐射(C)和风速(D)的日变化  
Fig. 1 Diurnal variations of air temperature (A), air relative humidity (B), solar radiation (C), and wind speed (D) at measuring points of different types of greenbelt and non-greenbelt in riparian zone of Suzhou River in Shanghai City in summer

表1 上海市苏州河滨水带不同类型绿地和非绿地测点夏季空气温度、空气相对湿度、太阳辐射和风速的比较

Table 1 Comparison on air temperature, air relative humidity, solar radiation, and wind speed at measuring points of different types of greenbelt and non-greenbelt in riparian zone of Suzhou River in Shanghai City in summer

测点 <sup>1)</sup> Measuring point <sup>1)</sup>	空气温度/℃ Air temperature			空气相对湿度/% Air relative humidity		
	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average
P1	39.2	33.3	37.1	62.5	35.9	45.4
P2	38.8	33.6	37.2	56.4	32.5	40.9
P3	39.2	33.1	37.0	60.3	33.3	42.7
P4	39.8	33.4	37.6	58.5	32.7	41.4
P5	39.0	33.5	37.4	56.4	31.9	40.3
P6	39.8	33.4	37.8	58.3	32.0	40.6
P7	41.2	32.9	37.8	60.9	30.1	41.0
P8	39.8	33.4	37.6	55.4	30.6	39.2
P9	40.2	33.6	37.9	54.5	29.6	38.2
P10	35.3	31.7	34.1	57.0	42.5	48.4

测点 <sup>1)</sup> Measuring point <sup>1)</sup>	太阳辐射/W·m <sup>-2</sup> Solar radiation			风速/km·h <sup>-1</sup> Wind speed		
	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average
P1	690.0	19.7	176.7	3.0	0.0	0.9
P2	145.7	14.7	138.5	5.7	0.0	1.2
P3	582.3	16.3	148.6	4.3	0.0	0.9
P4	884.0	49.7	462.4	5.0	0.0	1.7
P5	818.3	99.3	405.7	4.3	0.0	1.3
P6	837.7	25.7	313.5	2.7	0.0	1.0
P7	835.7	35.0	359.5	2.3	0.0	0.2
P8	837.3	38.0	436.0	2.3	0.0	0.6
P9	1 171.3	39.0	506.7	1.3	0.0	0.2
P10	613.0	32.0	186.0	1.0	0.0	0.0

<sup>1)</sup> P1: NBy-AH-SOS; P2: By-AH-SOS; P3: NBy-SH-SOS; P4: By-RPM-OS; P5: By-ASH-SES; P6: By-SH-SOS; P7: NBy-ASH-SES; P8: By-RPS-OS; P9: NBy-RPS-OS; P10: By-RPW-OS. NBy: 非临水 Non by water; By: 临水 By water. AH: 乔草 Arbor-herb; SH: 灌草 Shrub-herb; ASH: 乔灌草 Arbor-shrub-herb. SOS: 半开敞空间 Semi-open space; OS: 开敞空间 Open space; SES: 半围合空间 Semi-enclosed space. RPM: 砖石制硬质铺装 Rigid pavement of masonry; RPS: 板石制硬质铺装 Rigid pavement of slabstone; RPW: 木制硬质铺装 Rigid pavement of wood.

现在 13:00 至 13:30 时段。各测点空气温度的最大值、最小值和平均值分别为 35.3 ℃ ~ 41.2 ℃、31.7 ℃ ~ 33.6 ℃ 和 34.1 ℃ ~ 37.9 ℃, 其中, P9 测点(非临水-板石制硬质铺装-开敞空间)空气温度的最大值和平均值最高, 最小值较高; 而 P10 测点(临水-木制硬质铺装-开敞空间)空气温度的最大值、最小值和平均值均最低。

从空气温度的平均值来看, 不同类型绿地供试 6 个测点的空气温度由低到高依次为 P3 测点(非临水-灌草-半开敞空间)、P1 测点(非临水-乔草-半开敞空间)、P2 测点(临水-乔草-半开敞空间)、P5 测点(临水-乔灌草-半围合空间)、P6 测点(临水-灌草-半开敞空间)和 P7 测点(非临水-乔灌草-半围合空间), 不同类型非绿地供试 4 个测点的空气温度由低到高依次为 P10 测点、P4 测点(临水-砖石制硬质铺装-开敞空间)和 P8 测点(临水-板石制硬质铺装-

开敞空间)、P9 测点。总体来看, 绿地测点的空气温度低于非绿地测点。

2.1.2 空气相对湿度比较 实验结果(图 1-B 和表 1)表明, 各测点空气相对湿度的日变化趋势基本相似, 总体上呈先降低后升高的趋势, 各测点空气相对湿度的谷值均出现在 13:00。各测点空气相对湿度的最大值、最小值和平均值分别为 54.5% ~ 62.5%、29.6% ~ 42.5% 和 38.2% ~ 48.4%, 其中, P10 测点空气相对湿度的最小值和平均值最高, 最大值较高; P9 测点空气相对湿度的最大值、最小值和平均值均最低。

从空气相对湿度的平均值来看, 不同类型绿地供试 6 个测点的空气相对湿度由低到高依次为 P5 测点、P6 测点、P2 测点、P7 测点、P3 测点、P1 测点, 不同类型非绿地供试 4 个测点的空气相对湿度由低到高依次为 P9 测点、P8 测点、P4 测点、P10 测点。总

体来看,绿地测点与非绿地测点间的空气相对湿度差异不明显。

2.1.3 太阳辐射比较 实验结果(图1-C和表1)表明:各测点太阳辐射的日变化趋势基本相似,总体上呈先升高后降低的趋势且波动变化明显,各测点太阳辐射的峰值多出现在11:00至11:30时段。各测点太阳辐射的最大值、最小值和平均值分别为145.7~1171.3、14.7~99.3和138.5~506.7  $W \cdot m^{-2}$ ,其中,P9测点太阳辐射的最大值和平均值最高,最小值较高;P2测点太阳辐射的最大值、最小值和平均值均最低。

从太阳辐射的平均值来看,不同类型绿地供试6个测点的太阳辐射由低到高依次为P2测点、P3测点、P1测点、P6测点、P7测点、P5测点,不同类型非绿地供试4个测点的太阳辐射由弱到强依次为P10测点、P8测点、P4测点、P9测点。总体来看,绿地测点的太阳辐射低于非绿地测点。

2.1.4 风速比较 实验结果(图1-D和表1)表明:各测点风速的日变化趋势基本相似,呈明显的波动变化趋势,各测点风速的峰值多出现在12:00至13:30时段。各测点风速的最大值和平均值分别为1.0~5.7和0.0~1.7  $km \cdot h^{-1}$ ,最小值均为0.0  $km \cdot h^{-1}$ ,其中,P2测点风速的最大值最高,平均值较高;P4测点风速的平均值最高,最大值接近最高;P10测点风速的最大值和平均值最低。

从风速的平均值来看,不同类型绿地供试6个测点的风速由小到大依次为P7测点、P1和P3测点、P6测点、P2测点、P5测点,不同类型非绿地供试4个测点的风速由低到高依次为P10测点、P9测点、P8测点、P4测点。总体来看,绿地测点的风速高于非绿地测点。

## 2.2 不同类型绿地和非绿地夏季人体热舒适度评价分析

2.2.1 人体热舒适度主观评价分析 在上海市苏州河滨水带不同类型绿地和非绿地测点中,根据热感觉投票(TSV)结果,58%受访者感觉热,18%受访者感觉微热,12%受访者感觉非常热,8%受访者感觉不热不冷,4%受访者感觉暖,没有受访者感觉非常冷、冷、微冷或凉;根据热舒适度投票(TCV)结果,12%受访者感觉非常不舒适,60%受访者感觉不舒适,28%受访者感觉舒适,没有受访者感觉非常舒适;根据热期望投票(TP)结果,98%受访者希望冷一点,2%受访

者希望不变,没有受访者希望热一点;根据湿度感觉投票(HSV)结果,65%受访者感觉潮湿,29%受访者感觉不干不湿,6%受访者感觉干燥,没有受访者感觉非常干燥或非常潮湿;根据太阳辐射感觉投票(RSV)结果,60%受访者感觉太阳辐射不强不弱,30%受访者感觉太阳辐射强,10%受访者感觉太阳辐射非常强,没有受访者感觉太阳辐射弱或非常弱;根据风速感觉投票(WSV)结果,38%受访者感觉风速小,33%受访者感觉无风,27%受访者感觉风速不大不小,2%受访者感觉风速大。

2.2.2 人体热舒适度客观评价分析 依据不同类型绿地和非绿地测点夏季空气温度、空气相对湿度、太阳辐射和风速4个主要小气候因子的测定结果及受访者的总体生理指标平均值、服装热阻和平均新陈代谢率计算人体热舒适度客观评价指标值[包括预测平均投票(PMV)、生理等效温度(PET)和标准有效温度(SET\*)],结果见表2。

由表2可见:上海市苏州河滨水带不同类型绿地和非绿地测点的PMV值为2.9~4.9,人体感受为炎热和酷热;PET值为35.8  $^{\circ}C$ ~50.0  $^{\circ}C$ ,人体感受为较热和炎热;SET\*值为26.9  $^{\circ}C$ ~38.7  $^{\circ}C$ ,人体感受为舒适、稍暖、较热和炎热。

由表2还可见:上海市苏州河滨水带不同类型绿地和非绿地测点的PMV、PET和SET\*值均大于0,且均与实际人体热舒适度呈负相关。不同类型绿地供试6个测点的PMV、PET和SET\*值从低到高依次为P2测点(临水-乔草-半开敞空间)、P3测点(非临水-灌草-半开敞空间)、P1测点(非临水-乔草-半开敞空间)、P6测点(临水-灌草-半开敞空间)、P5测点(临水-乔灌草-半围合空间)、P7测点(非临水-乔灌草-半围合空间),不同类型非绿地供试4个测点的PMV、PET和SET\*值从低到高依次为P10测点(临水-木制硬质铺装-开敞空间)、P4测点(临水-砖石制硬质铺装-开敞空间)、P8测点(临水-板石制硬质铺装-开敞空间)、P9测点(非临水-板石制硬质铺装-开敞空间),说明在不同类型绿地中P2测点的人体感觉最舒适,P7测点的人体感觉最不舒适;而在不同类型非绿地中P10测点的人体感觉最舒适,P9测点的人体感觉最不舒适。

总体来看,各绿地测点的PMV、PET和SET\*值低于非绿地测点,说明绿地测点的人体热舒适度优于非绿地测点。

表 2 上海市苏州河滨水带不同类型绿地和非绿地测点夏季人体热舒适度的客观评价分析

Table 2 Analysis on objective evaluation of human thermal comfort at measuring points of different types of greenbelt and non-greenbelt on riparian zone of Suzhou River in Shanghai City in summer

测点 <sup>1)</sup> Measuring point <sup>1)</sup>	预测平均投票 Predicted mean vote		生理等效温度 Physiological equivalent temperature		标准有效温度 Standard effective temperature	
	数值 Value	人体感觉 Body feeling	数值/°C Value	人体感觉 Body feeling	数值/°C Value	人体感觉 Body feeling
P1	3.4	酷热 Sizzling	38.7	较热 Hotter	29.4	舒适 Comfort
P2	3.1	酷热 Sizzling	35.8	较热 Hotter	26.9	舒适 Comfort
P3	3.3	酷热 Sizzling	37.8	较热 Hotter	28.7	舒适 Comfort
P4	4.2	酷热 Sizzling	45.2	炎热 Scorching	33.8	稍暖 A bit warm
P5	4.1	酷热 Sizzling	44.1	炎热 Scorching	33.1	稍暖 A bit warm
P6	3.9	酷热 Sizzling	42.7	炎热 Scorching	32.3	稍暖 A bit warm
P7	4.3	酷热 Sizzling	45.2	炎热 Scorching	35.1	较热 Hotter
P8	4.3	酷热 Sizzling	46.2	炎热 Scorching	35.1	较热 Hotter
P9	4.9	酷热 Sizzling	50.0	炎热 Scorching	38.7	炎热 Scorching
P10	2.9	炎热 Scorching	36.4	较热 Hotter	28.4	舒适 Comfort

<sup>1)</sup> P1: NBy-AH-SOS; P2: By-AH-SOS; P3: NBy-SH-SOS; P4: By-RPM-OS; P5: By-ASH-SES; P6: By-SH-SOS; P7: NBy-ASH-SES; P8: By-RPS-OS; P9: NBy-RPS-OS; P10: By-RPW-OS. NBy: 非临水 Non by water; By: 临水 By water. AH: 乔草 Arbor-herb; SH: 灌草 Shrub-herb; ASH: 乔灌草 Arbor-shrub-herb. SOS: 半开敞空间 Semi-open space; OS: 开敞空间 Open space; SES: 半围合空间 Semi-enclosed space. RPM: 砖石制硬质铺装 Rigid pavement of masonry; RPS: 板石制硬质铺装 Rigid pavement of slabstone; RPW: 木制硬质铺装 Rigid pavement of wood.

### 3 讨论和结论

测定结果显示:上海市苏州河滨水带不同类型绿地和非绿地测点间夏季的空气温度、空气相对湿度、太阳辐射和风速 4 个主要小气候因子存在明显差异。就空气温度平均值而言,P3 测点(非临水-灌草-半开敞空间)在供试的 6 个绿地测点中最低,人体感觉最舒适,而 P10 测点(临水-木制硬质铺装-开敞空间)在供试的 4 个非绿地测点中最低,人体感觉最舒适;就空气相对湿度平均值而言,P5 测点(临水-乔灌草-半围合空间)在供试的 6 个绿地测点中最低,人体感觉最舒适,而 P9 测点(非临水-板石制硬质铺装-开敞空间)在供试的 4 个非绿地测点中最低,人体感觉最舒适;就太阳辐射平均值而言,P2 测点(临水-乔草-半开敞空间)在供试的 6 个绿地测点中最低,人体感觉最舒适,而 P10 测点在供试的 4 个非绿地测点中最低,人体感觉最舒适;就风速平均值而言,P5 测点在供试的 6 个绿地测点中最高,人体感觉最舒适,而 P4 测点(临水-砖石制硬质铺装-开敞空间)在供试的 4 个非绿地测点中最高,人体感觉最舒适。综合考虑认为,在上海市苏州河滨水带绿地结构规划设计中,建议优先考虑临水-乔灌草-半围合空间的绿地形式,其次考虑非临水-灌草-半开敞空间和临水-乔草-半开敞空间的绿地形式;而在非绿地结构

规划设计中,建议优先考虑临水-木制硬质铺装-开敞空间的非绿地形式,其次考虑非临水-板石制硬质铺装-开敞空间和临水-砖石制硬质铺装-开敞空间的非绿地形式。

人体热舒适度主观评价分析结果表明:58%受访者热感觉投票(TSV)为热,60%受访者的热舒适度投票(TCV)为不舒适,98%受访者的热期望投票(TP)为冷一点,65%受访者的湿度感觉投票(HSV)为潮湿,60%受访者的太阳辐射感觉投票(RSV)为不强不弱,71%受访者的风速感觉投票(WSV)为小或无风。综上所述,受自身热认知感觉的主观影响及上海市夏季气候的客观影响,不同类型绿地和非绿地测点中的大多数受访者普遍认为气温偏高、湿度大、太阳辐射一般、风速小、人体舒适度较差,因此,在上海市苏州河滨水带绿地和非绿地的规划设计中,建议更充分地考虑使用者的感受,合理设计绿地和非绿地结构,以此提高人体的舒适度。

人体热舒适度客观评价分析结果表明:P2 测点的预测平均投票(PMV)、生理等效温度(PET)和标准有效温度(SET\*)在供试的 6 个绿地测点中均最低,人体感觉最舒适,而 P10 测点的 PMV、PET 和 SET\*在供试的 4 个非绿地测点中最低,人体感觉最舒适,因此,在对上海市苏州河滨水带绿地和非绿地的规划设计中,应当优先考虑和应用临水-乔草-半开敞空间的绿地形式及临水-木制硬质铺装-开敞空

间的非绿地形式。

总体而言,绿地测点的空气温度、太阳辐射、PMV、PET和SET\*均低于非绿地测点,空气相对湿度与非绿地测点差异不明显,但风速却高于非绿地测点,因此,与非绿地相比,受访者在绿地中的人体感觉更舒适。

综上所述,从人体热舒适度和景观美化角度考虑,建议在上海市苏州河滨水带的规划设计中优先采用绿地形式,尤其是临水-乔草-半开敞空间和临水-乔灌草-半围合空间的绿地形式。

#### 参考文献:

- [1] HATHWAY E A, SHARPLES S. The interaction of rivers and urban form in mitigating the Urban Heat Island effect; a UK case study [J]. *Building and Environment*, 2012, 58: 14-22.
- [2] 彭保发,石忆邵,王贺封,等.城市热岛效应的影响机理及其作用规律:上海市为例[J].*地理学报*, 2013, 68(11): 1461-1471.
- [3] 刘滨谊,张德顺,张琳,等.上海城市开敞空间小气候适应性设计基础调查研究[J].*中国园林*, 2014(12): 17-22.
- [4] 刘滨谊,林俊.城市滨水带环境小气候与空间断面关系研究:以上海苏州河滨水带为例[J].*风景园林*, 2015(6): 46-54.
- [5] 董芦笛,李孟柯,樊亚妮.基于“生物气候场效应”的城市户外生活空间气候适应性设计方法[J].*中国园林*, 2014(12): 23-26.
- [6] 张琳,刘滨谊,林俊.城市滨水带风景园林小气候适应性设计初探[J].*中国城市林业*, 2014, 12(4): 36-39.
- [7] WONG M S, NICHOL J E, TO P H, et al. A simple method for designation of urban ventilation corridors and its application to urban heat island analysis [J]. *Building and Environment*, 2010, 45: 1880-1889.
- [8] GORDON D L A. Implementing urban waterfront redevelopment in an historic context; a case study of the Boston Naval Shipyard [J]. *Ocean and Coastal Management*, 1999, 42: 909-931.
- [9] 齐静静,刘京,郭亮.遥感技术应用于河流对城市气候影响研究[J].*哈尔滨工业大学学报*, 2010, 42(5): 797-800, 805.
- [10] 纪鹏,朱春阳,李树华.夏季城市河流宽度对绿地温湿效益的影响[J].*应用生态学报*, 2012, 23(3): 679-684.
- [11] NAKAYAMA T, FUJITA T. Cooling effect of water-holding pavements made of new materials on water and heat budgets in urban areas [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 96: 56-67.
- [12] XU J, WEI Q, HUANG X, et al. Evaluation of human thermal comfort near urban waterbody during summer [J]. *Building and Environment*, 2010, 45: 1072-1080.
- [13] 李书严,轩春怡,李伟,等.城市中水体的微气候效应研究[J].*大气科学*, 2008, 32(3): 552-560.
- [14] 李留振,郑俊霞,毕丽华,等.黄河故道滩地不同植被的湿地效应分析[J].*江苏农业科学*, 2010(4): 390-392.
- [15] 蒋志祥,刘京,宋晓程,等.水体对城市区域热湿气候影响的建模及动态模拟研究[J].*建筑科学*, 2013, 29(2): 85-90.
- [16] 李冬林,张小茜,金雅琴,等.京杭运河淮安段不同植物护坡模式消风减噪及小气候效应[J].*生态与农村环境学报*, 2012, 28(3): 249-254.
- [17] 王文星,陈守跃,李留振,等.黄河滩地4种不同植被的降低风速效应分析[J].*四川林业科技*, 2010, 31(5): 121-123.
- [18] 翟宝黔,李留振.河岸带不同植被的小气候对光照强度的影响[J].*四川林业科技*, 2010, 31(6): 61-63.
- [19] CHEN L, NG E. Outdoor thermal comfort and outdoor activities: a review of research in the past decade [J]. *Cities*, 2012, 29: 118-125.
- [20] LIU W, ZHANG Y, DENG Q. The effects of urban microclimate on outdoor thermal sensation and neutral temperature in hot-summer and cold-winter climate [J]. *Energy and Buildings*, 2016, 128: 190-197.
- [21] PERINI K, MAGLIOCCO A. Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort [J]. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2014, 13: 495-506.
- [22] TALEGHANI M, KLEEREKOPER L, TENPIERIK M, et al. Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands [J]. *Building and Environment*, 2015, 83: 65-78.
- [23] 林波荣,李莹,赵彬,等.居住区室外热环境的预测、评价与城市环境建设[J].*城市环境与城市生态*, 2002, 15(1): 41-43.
- [24] 李华.人体热舒适性在城市规划领域的研究综述[J].*四川建筑*, 2014, 34(5): 48-50.
- [25] YANG B, OLOFSSON T, NAIR G, et al. Outdoor thermal comfort under subarctic climate of north Sweden: a pilot study in Umeå [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 28: 387-397.
- [26] RUPP R F, VÁSQUEZ N G, LAMBERTS R. A review of human thermal comfort in the built environment [J]. *Energy and Buildings*, 2015, 105: 178-205.
- [27] LAI D, GUO D, HOU Y, et al. Studies of outdoor thermal comfort in northern China [J]. *Building and Environment*, 2014, 77: 110-118.
- [28] CHATZIDIMITRIOU A, YANNAS S. Microclimate development in open urban spaces: the influence of form and materials [J]. *Energy and Buildings*, 2015, 108: 156-174.
- [29] 赵静,刘蔚巍,皇甫昊,等.夏热冬冷气候城市公共空间热环境季节特征[J].*土木建筑与环境工程*, 2014, 36(5): 55-60.
- [30] ROBITU M, MUSY M, INARD C, et al. Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate [J]. *Solar Energy*, 2006, 80: 435-447.
- [31] PICOT X. Thermal comfort in urban spaces: impact of vegetation growth. Case study: Piazza della Scienza, Milan, Italy [J]. *Energy and Buildings*, 2004, 36: 329-334.

- [32] COHEN P, POTCHTER O, MATZARAKIS A. Daily and seasonal climatic conditions of green urban open spaces in the Mediterranean climate and their impact on human comfort [J]. *Building and Environment*, 2012, 51: 285-295.
- [33] MARTINELLI L, LIN T, MATZARAKIS A. Assessment of the influence of daily shadings pattern on human thermal comfort and attendance in Rome during summer period [J]. *Building and Environment*, 2015, 92: 30-38.
- [34] 李俊鸽, 杨柳, 刘加平. 夏热冬冷地区人体热舒适气候适应模型研究[J]. *暖通空调*, 2008, 38(7): 23-26.
- [35] 刘滨谊, 梅歆, 匡纬. 上海城市居住区风景园林空间小气候要素与人群行为关系测析[J]. *中国园林*, 2016, 32(1): 5-9.
- [36] 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.
- [37] NIKOLOPOULOU M, STEEMERS K. Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces[J]. *Energy and Buildings*, 2003, 35: 95-101.
- [38] NIKOLOPOULOU M, LYKOURIS S. Thermal comfort in outdoor urban spaces: analysis across different European countries [J]. *Building and Environment*, 2006, 41: 1455-1470.
- [39] 安玉松, 于航, 王恬, 等. 上海地区老年人夏季室外活动热舒适度的调查研究[J]. *建筑热能通风空调*, 2015, 34(1): 23-26.
- [40] 纪鹏, 朱春阳, 李树华. 城市河道绿带宽度对空气温湿度影响[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(1): 37-44.
- [41] 纪鹏, 朱春阳, 王洪义, 等. 城市中不同宽度河流对滨河绿地四季温湿度的影响[J]. *湿地科学*, 2013, 11(2): 240-245.
- [42] 史利江, 郑丽波, 张卫国, 等. 上海土壤有机碳储量及其空间分布特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(12): 1442-1447.
- [43] 周秀佳. 上海的主要自然植被类型及其分布[J]. *植物生态学与地植物学丛刊*, 1984, 8(3): 189-198.
- [44] 曾光, 田永铮, 赵华, 等. 环境因素及综合因素对PMV指标的影响分析[J]. *建筑节能*, 2007, 35(3): 11-16.
- [45] GÓMEZ F, CUEVA A P, VALCUENDE M, et al. Research on ecological design to enhance comfort in open spaces of a city (Valencia, Spain). Utility of the physiological equivalent temperature (PET) [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 57: 27-39.
- [46] NAZARIAN N, FAN J, SIN T, et al. Predicting outdoor thermal comfort in urban environments: a 3D numerical model for standard effective temperature[J]. *Urban Climate*, 2017, 20: 251-267.

(责任编辑: 佟金凤)

## 《植物资源与环境学报》启事

为了扩大科技期刊的信息交流、充分实现信息资源共享,《植物资源与环境学报》已先后加入“中国学术期刊(光盘版)”、“万方数据——数字化期刊群”和“中文科技期刊数据库”等网络文献资源数据库,凡在本刊发表的论文将编入数据库供上网交流、查阅及检索,作者的著作权使用费与本刊稿酬一次性给付,不再另付。如作者不同意将文章收编入数据库,请在来稿时声明,本刊将做适当处理。

《植物资源与环境学报》编辑部目前仅接受网上投稿,投稿网址为 <http://zwzy.cnbg.net>; 投稿咨询电话: 025-84347014; QQ: 2219161478; E-mail: [zwzybjb@163.com](mailto:zwzybjb@163.com)。

《植物资源与环境学报》编辑部  
2018-05