

树冠空间结构对微气候影响的模拟

卫笑¹, 郝日明^{1,2}, 张明娟^{1,2}, 沈昊天¹, 邱易¹, 耿红凯¹

(1. 南京农业大学园艺学院, 江苏南京 210095; 2. 南京农业大学农业部景观设计重点实验室, 江苏南京 210095)

摘要: 随着城市化水平的提高, 人们对于健康舒适的公共空间的要求也日益增加。为了更加科学地从空间结构的角度对微气候环境提出改善策略, 运用 ENVI-met 模拟软件, 以理想状态下的纯乔木林环境为研究对象, 针对南京市的气候条件, 分析 5 种常见的乔木树冠形态(圆柱形、圆球形、倒卵形、三角形和倒三角形)和 3 种平面布局形式(规则散点式、集中块状式、自然集群式)对微气候环境的温度、湿度及人体热舒适度(PMV 指数)的影响。研究表明: 树冠形态和布局形式对群落的降温增湿效应具有显著影响($P<0.05$)。“上大下小”型的倒卵形和倒三角形树冠的乔木群落降温增湿强度最高、人体热舒适度体验也最好。集中块状式布局的群落降温增湿强度要明显高于规则散点式和自然集群式, 但自然集群式布局时人体热舒适度体验更好。图 7 表 2 参 38

关键词: 森林生态学; ENVI-met; 树冠形态; 布局形式; 微气候

中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2019)04-0783-10

Microclimate changes with simulated canopy spatial structures

WEI Xiao¹, HAO Riming^{1,2}, ZHANG Mingjuan^{1,2}, SHEN Haotian¹, QIU Yi¹, GENG Hongkai¹

(1. College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, Jiangsu, China; 2. Key Laboratory of Landscape, Ministry of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, Jiangsu, China)

Abstract: The microclimatic environment created by a plant community could provide wonderful rest space for people. This study focused on how to regulate the microclimate by improving the structure and characteristics of a plant community. The microclimatic environment of Nanjing, a typical city with high temperature and humidity in summer, was studied. Using simulation software, ENVI-met, pure forests in ideal conditions were selected to analyze the impact of five common canopy shapes (cylindrical, spheroidal, obovate, triangular, and inverted triangular) and three layout forms (regular-scatter, centralized-block, and natural-distribution) on temperature, humidity, and thermal comfort (PMV) of a plant community in Nanjing during summer. Results indicated that canopy shapes and layout forms had a significant influence on the cooling and humidification effect of a plant community ($P<0.05$). The tree communities with an obovate canopy or inverted triangular canopy, which were typically large in the upper part of the canopy and small in the lower part, had the highest cooling and humidification efficiency which could provide the best thermal comfort experience. The cooling and humidification efficiency of the communities planted in a centralized-block form were higher than those in a regular-scatter or natural-distribution form; whereas, the thermal comfort experience of the community planted in a natural-distribution form was better. [Ch, 7 fig. 2 tab. 38 ref.]

Key words: forest ecology; ENVI-met; canopy shapes; layout forms; microclimate

植物群落具有显著的温湿效益, 在热岛效益不断加剧的城市中发挥着重要的微气候调节作用^[1-4]。

收稿日期: 2018-08-15; 修回日期: 2018-11-19

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(31200530); 中央高校基本科研业务经费资助项目(KYZ201737)

作者简介: 卫笑, 从事景观生态学研究。E-mail: smilee.w@outlook.com。通信作者: 张明娟, 副教授, 从事植物与景观生态学研究。E-mail: zhang-mj@njau.edu.cn

植物群落的冠层结构,如郁闭度、叶面积指数、绿量、覆盖率等会影响群落的降温增湿效益^[5-8],但是针对不同树冠形态和布局形式对群落微气候环境影响的研究还较为欠缺。乔木树冠反射和吸收了大量的太阳辐射,是乔木能为林下空间提供降温增湿效应的主要原因,而不同的树冠形态也会显著影响其遮阳效果^[9]。关于布局形式对微气候影响的研究多集中在竖向结构上乔灌木的合理搭配^[10-11],对于横向上树种的平面布局形式却较少提及。ENVI-met是一款微气候模拟软件。该软件基于热力学和流体力学原理,较为全面地考虑气候因子及其相互作用,能够动态模拟城市小尺度范围内的表面、空气和植被之间的相互作用^[12]。已有较多研究从街道^[13]、居住区^[14]、城市中心区^[15]、古典园林^[16]、森林^[17]等多种尺度对 ENVI-met 进行了校验,证实 ENVI-met 在模拟上的可靠性和准确性。基于上述研究基础,也有很多学者运用该软件进行纯模拟研究,如研究城市步行街空间形态对其微气候的影响^[18],探讨城市空间形态指标与热环境的相关性^[19],模拟分析高层住宅小区建筑形态对微气候的影响^[20],以及不同绿地布局模式下居住区的夏季微气候特征^[21]等。说明在条件有限且研究内容较繁杂的情况下,纯模拟的研究方式也有很高的应用价值。南京市位于长江三角洲,夏季炎热多雨,在中国夏季高温高湿气候特征的城市中具有一定代表性。为进一步探讨树冠形态和平面布局形式对夏季植物群落微气候的影响,本研究以南京市的绿地为例,运用 ENVI-met 软件,以纯乔木林环境为研究对象,设计多种模拟工况,分析不同树冠形态和布局形式下植物群落的温湿效应及人体热舒适度,为改善夏季微气候环境,以科学的栽植设计来适应不同类型的人群行为活动需求,提供合理的参考依据。

1 研究地概况与研究方法

1.1 研究地概况

南京位于中国东部,地处长江下游,属于北亚热带中部季风气候区,四季分明,光照充足,无霜期长,热量充裕。年平均降水量为 1 106.5 mm,相对湿度为 76.0%,平均气温为 15.4℃。南京是典型的夏热冬冷地区。冬季以东北风为主,1月平均最低气温为-1.6℃;夏季以东南风为主,7月平均最高气温为 30.6℃。

1.2 研究方法

由于本研究只针对树冠形态和平面布局形式对微气候的影响,但在实际情况中很难排除其他环境因素的干扰,所以实际测量的方法对本研究不具实际可行性。因此,本研究选择 ENVI-met 软件,使用纯模拟方法,将所有模拟工况周边环境都设置为相同条件,以保证结果的相对可靠性。

1.2.1 建立研究模型 选取南京市理想情况下的纯乔木林群落为研究对象。通过前期预模拟,在确保温湿效果显著和便于模拟的前提下,根据常见的植物群落面积,最终确定模型大小为 160 m × 160 m × 50 m,网格数为 80 × 80 × 25,单个网格的分辨率为 2 m × 2 m × 2 m。模型中共布局 36 株同种乔木来模拟纯林环境。

1.2.2 确定模拟工况 ①乔木树冠形态。乔木的树冠形态可分为规则形和不规则形,有学者^[22]将常见的规则型树冠按照遮挡太阳辐射量的关系简化分成圆柱形、三角形、倒三角形、圆形和半圆形等 5 种基本树冠形态。通过文献资料分析,对南京地区园林中常用的 100 种乔木的树冠形态进行分类,确定了 5 种包含植物种类较多的常见树冠形态(表 1),分别为圆柱形、圆球形、倒卵形、三角形和倒三角形^[23-29]。在 ENVI-met 中建立这 5 种具有典型树冠形态的乔木模型,模型剖面图如图 1 所示。为保证数据可比性,所建植物模型的高度一致,均为 15 m,实际栽植参考时可进行等比例缩小。圆柱形、圆球形和三角形树冠的乔木冠幅均为 11 m,倒卵形树冠的乔木冠幅为 13 m,倒三角形树冠的乔木冠幅为 15 m。由于研究只针对树冠形态,因此将 5 种乔木的叶片属性、根系形态等都设置为相同指标。②平面布局形式。选择 3 种园林中常见的乔木群落布局形式,规则散点式、集中块状式和自然集群式(图 2)。其中规则散点式为 6 × 6 的点阵式排列,相邻乔木的中心点之间相距 10 个像素格,即 20 m。集中块状式为 4 个 3 × 3 的规则散点式布局组合而成,相邻乔木的中心点之间相距 6 个像素格,即 12 m。自然集群式中各乔木以自然界常见的集群形式分散布局。通过不同树冠形态和群落布局形式的排列组合,得出共计 15 种不同的模拟工况。

1.2.3 设置模拟参数 选择的模拟日期为夏至日,为确保模拟的普适性,以中国气象数据网上公布的南

表 1 南京常见园林乔木及其树冠形态分类

Table 1 100 common arbors in Nanjing and the classification of their canopy shapes		
树冠形态	常见树种	数量/种
圆柱形	毛白杨 <i>Populus tomentosa</i> , 日本珊瑚树 <i>Viburnum odoratissimum</i> var. <i>awabuki</i> , 塔柏 <i>Sabina chinensis</i> ‘Pyramidalis’, 加杨(<i>Populus</i> × <i>canadensis</i> , 意杨 <i>Populus</i> × <i>canadensis</i> subsp. I-214	5
	白玉兰 <i>Magnolia denudata</i> , 二乔玉兰 <i>Magnolia soulangeana</i> , 乐昌含笑 <i>Michelia chapensis</i> , 深山含笑 <i>Michelia maudiae</i> , 杜仲 <i>Eucommia ulmoides</i> , 栲树 <i>Koelreuteria paniculata</i> , 樟树 <i>Cinnamomum camphora</i> , 浙江楠 <i>Phoebe chekiangensis</i> , 紫楠 <i>Phoebe sheareri</i> , 大叶樟 <i>Cinnamomum austrosinense</i> , 毛泡桐 <i>Paulownia tomentosa</i> , 重阳木 <i>Bischofia polycarpa</i> , 皂荚 <i>Gleditsia sinensis</i> , 国槐 <i>Sophora japonica</i> , 刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> , 金枝槐 <i>Sophora japonica</i> ‘Golden Stem’, 无患子 <i>Sapindus mukorossi</i> , 榆树 <i>Ulmus pumila</i> , 朴树 <i>Celtis sinensis</i> , 珊瑚朴 <i>Celtis julianae</i> , 榔榆 <i>Ulmus parvifolia</i> , 臭椿 <i>Ailanthus altissima</i> , 黄连木 <i>Pistacia chinensis</i> , 东京樱花 <i>Cerasus yedoensis</i> , 日本晚樱 <i>Cerasus serrulata</i> var. <i>lannesiana</i> , 山樱花 <i>Cerasus serrulata</i> , 女贞 <i>Ligustrum lucidum</i> , 杨梅 <i>Myrica rubra</i> , 苦槠 <i>Castanopsis sclerophylla</i> , 青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i> , 麻栎 <i>Quercus acutissima</i> , 栓皮栎 <i>Quercus variabilis</i> , 苦楝 <i>Melia azedarach</i> , 香椿 <i>Toona sinensis</i> , 臭椿 <i>Ailanthus altissima</i> , 桑树 <i>Morus alba</i> , 构树 <i>Broussonetia papyrifera</i> , 美国山核桃 <i>Carya illinoensi</i> , 柿 <i>Diospyros kaki</i> , 白蜡 <i>Fraxinus chinensis</i> , 小蜡 <i>Ligustrum sinense</i>	41
圆球形		
倒卵形	木莲 <i>Manglietia fordiana</i> , 乌桕 <i>Sapium sebiferum</i> , 广玉兰 <i>Magnolia grandiflora</i> , 枫香 <i>Liquidambar formosana</i> , 桂花 <i>Osmanthus fragrans</i> , 喜树 <i>Camptotheca acuminata</i> , 枫杨 <i>Pterocarya stenoptera</i> , 二球悬铃木 <i>Platanus acerifolia</i> , 银杏 <i>Ginkgo biloba</i> , 七叶树 <i>Aesculus chinensis</i> , 南京椴 <i>Tilia miqueliana</i> , 石楠 <i>Photinia serrulata</i> , 桤木 <i>Photinia davidsoniae</i> , 枇杷 <i>Eriobotrya japonica</i> , 杜梨 <i>Pyrus betulifolia</i> , 山楂 <i>Crataegus pinnatifida</i> , 黄檀 <i>Dalbergia hupeana</i> , 色木槭 <i>Acer mono</i> , 茶条槭 <i>Acer ginnala</i> , 梧桐 <i>Firmiana platanifolia</i> , 梓树 <i>Catalpa ovata</i> , 楸树 <i>Catalpa bungei</i>	22
	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i> , 水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i> , 池杉 <i>Taxodium ascendens</i> , 柳杉 <i>Cryptomeria fortunei</i> , 落羽杉 <i>Taxodium distichum</i> , 马尾松 <i>Pinus massoniana</i> , 金钱松 <i>Pseudolarix amabilis</i> , 雪松 <i>Cedrus deodara</i> , 日本五针松 <i>Pinus parviflora</i> , 白皮松 <i>Pinus bungeana</i> , 黑松 <i>Pinus thunbergii</i> , 火炬松 <i>Pinus taeda</i> , 湿地松 <i>Pinus elliotii</i> , 油松 <i>Pinus tabuliformis</i> , 圆柏 <i>Sabina chinensis</i> , 龙柏 <i>Sabina chinensis</i> ‘Kaizuca’, 金叶桧 <i>Sabina chinensis</i> ‘Aurea’, 香榧 <i>Torreya grandis</i> ‘Merrillii’, 罗汉松 <i>Podocarpus macrophyllus</i> , 鹅掌楸 <i>Liriodendron chinense</i> , 三角枫 <i>Acer buergerianum</i> , 杜英 <i>Elaeocarpus decipiens</i>	22
三角形		
倒三角形	榉树 <i>Zelkova serrata</i> , 合欢 <i>Albizia julibrissin</i> , 垂丝海棠 <i>Malus halliana</i> , 湖北海棠 <i>Malus hupehensis</i> , 西府海棠 <i>Malus</i> × <i>micromalus</i> , 紫叶李 <i>Prunus cerasifera</i> f. <i>atropurpurea</i>	6
垂枝形	垂柳 <i>Salix babylonica</i> , 旱柳 <i>Salix matsudana</i> , 龙爪槐 <i>Sophora japonica</i> var. <i>japonica</i> f. <i>pendula</i>	3
棕榈形	棕榈 <i>Trachycarpus fortunei</i>	1
总计		100

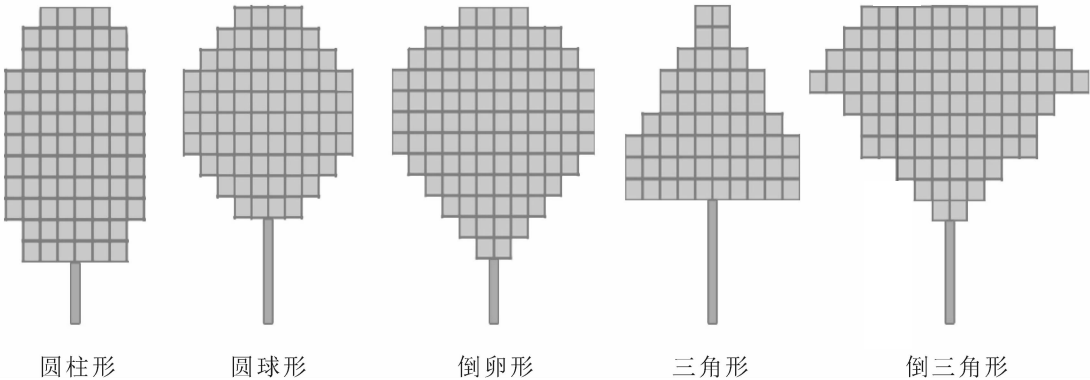


图 1 乔木模型示意图

Figure 1 Diagram of arbor models

京站点气象数据为参考，计算南京近 10 a 来夏至日的平均温湿度和风速，确定模拟当天的初始气象数

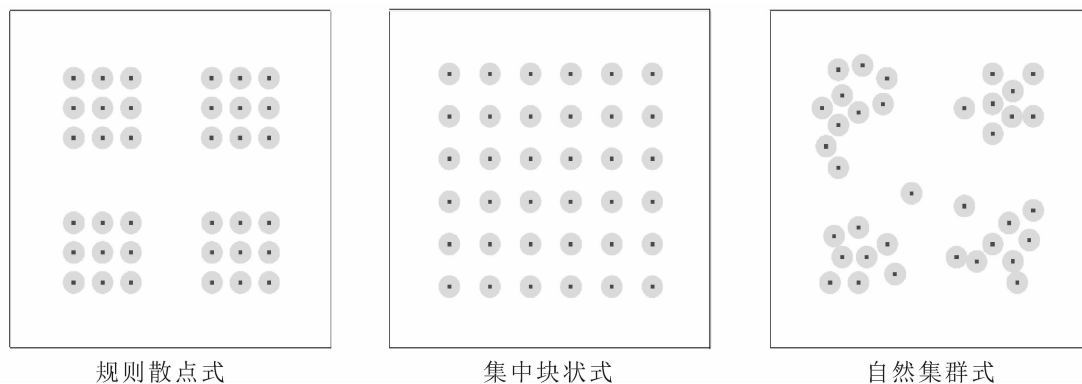


图2 群落平面布局形式示意图

Figure 2 Diagram of layout forms of community

表2 模拟参数设置

Table 2 Setup of simulation parameters

模拟时间	气象参数	数值	土壤参数	数值
2017-06-21 (7:00–18:00)	10 m 高度处风速	$3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	表层 0~20 cm 初始温度	300 K
	风向(0 为北风, 180 为南风)	135	表层 0~20 cm 土壤湿度	50%
	测量场地的粗糙长度	0.01	中层 20~50 cm 初始温度	300 K
	大气的初始温度	297 K	中层 20~50 cm 土壤湿度	51%
	模型顶端的绝对湿度(2 500 m)	$9.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$	深层 50 cm 以下初始温度	298 K
	2 m 高度处的相对湿度	50%	深层 50 cm 以下土壤湿度	45%
	simple forcing—温度	最小值在 5:00 时, 292 K 最大值在 15:00 时, 302 K		
	simple forcing—湿度	最小值在 15:00 时, 40% 最大值在 5:00 时, 60%		

据, 即整个模拟环境的初始温湿度和风速数据。模拟时间从 7:00 到 17:00, 为保证模拟的准确性, 去掉模拟最开始的 1 h, 以 8:00 至 17:00, 共计 10 h 作为重点分析时段, 1 h 输出 1 次模拟结果。当天每小时的温湿度值以 ENVI-met 的 simple force 模拟数据为准(表 2)。

1.3 数据分析

从计算的模拟结果中导出各模拟工况的气温、相对湿度和 PMV 指数。将模拟得出的温湿度数据进行整理, 首先计算出整个场地的逐时温湿度值, 即 80×80 、共 6 400 个像素格的温湿度平均值, 并利用 SPSS 对各工况之间的逐时温湿度进行成对样本 t 检验。第 2 步筛选出所有乔木树冠的垂直投影部分作为树荫下区域, 其余为非树荫区域, 分别计算出 2 个区域每小时的温湿度平均值, 以树荫和非树荫区域的温湿度差值作为该工况乔木群落的降温增湿强度, 分别用 T_p 和 H_p 表示。 $T_p = T_{\bar{t}} - T_i$ 。其中: $T_{\bar{t}}$ 是第 i 时刻的非树荫区域的平均气温($^{\circ}\text{C}$), T_i 为第 i 时刻树荫区域的平均气温($^{\circ}\text{C}$)。 $H_p = H_i - H_{\bar{t}}$ 。其中: H_i 为第 i 时刻树荫区域的平均湿度(%), $H_{\bar{t}}$ 是第 i 时刻的非树荫区域的平均湿度(%)。PMV 热舒适模型是将环境变量(气温、湿度、风速和平均辐射温度)和人为因素(新陈代谢率和服装热阻)综合计算, 得出用于表征人体热反应(冷热感)的评价指标, 它将热感觉分为从-3(冷)到 3(热)的 7 个等级, 其中 0 为舒适值^[30-31]。ENVI-met 软件在此基础上, 综合考虑了气温、平均辐射温度、水汽、风速、人体产生的能量、人体穿衣造成的皮肤温度、人体表面皮肤与空气的水汽交换、呼吸造成的能量交换等因素计算 PMV 指数^[32]。 $I_{\text{PMV}} = (0.028 + 0.303 \times e^{(-0.036m) + 0.0275}) \times q$ 。其中: m 为人体新陈代谢率; q 为热舒适系统的能量传输率, 计算需要的变量有气温、平均辐射温度、水汽压和风速、服装热阻、人体行走产生的能量等。

2 结果

2.1 整体区域的日均温湿度

2.1.1 相同布局形式下不同树冠形态的植物群落日均温湿度模拟值

整体来看, 树冠形态对群落温湿度

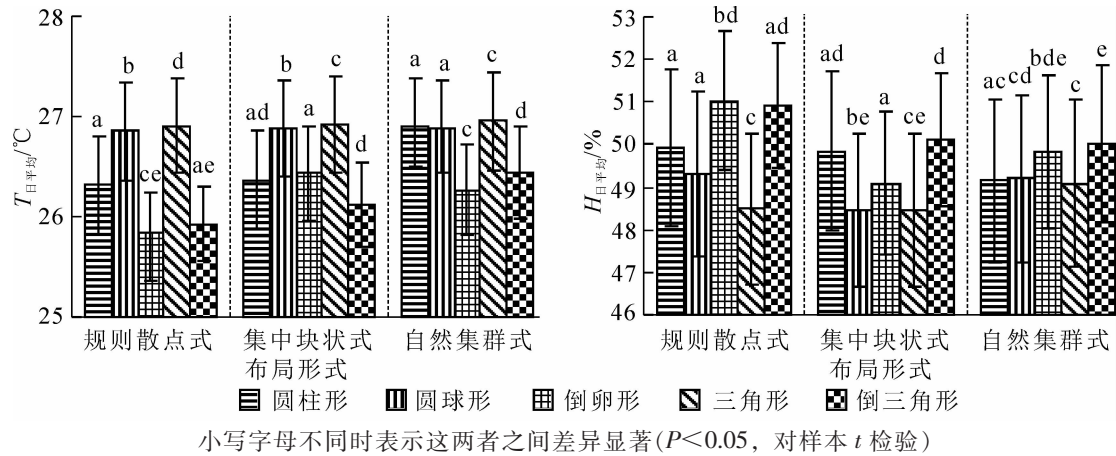


图 3 不同树冠形态工况的日均温湿度比较

Figure 3 Comparison of daily average temperature and humidity of simulated condition with different canopy shapes

有显著影响(图 3)。3 种布局形式下都是三角形树冠的群落日均气温最高[分别为 (26.91 ± 0.95) , (26.93 ± 0.96) , (26.95 ± 0.97) °C], 日均湿度最低(分别为 $48.49\% \pm 3.38\%$, $48.46\% \pm 3.40\%$, $49.10\% \pm 3.70\%$); 倒卵形或倒三角形日均气温最低[分别为 (25.84 ± 0.81) , (26.12 ± 0.84) , (26.27 ± 0.89) °C], 日均湿度最高(分别为 $51.03\% \pm 3.11\%$, $50.13\% \pm 2.98\%$, $50.03\% \pm 3.52\%$)。

2.1.2 相同树冠形态在不同布局形式下的植物群落日均温湿度模拟值 布局形式对植物群落日均温湿度也有一定影响(图 4)。日均气温方面, 圆柱形、圆球形、三角形和倒三角形树冠形态的乔木都是在自然集群式布局时日均气温最高[分别为 (26.90 ± 0.96) , (26.89 ± 0.96) , (26.95 ± 0.97) , (26.44 ± 0.91) °C], 规则散点式布局时最低[分别为 (26.31 ± 0.99) , (26.86 ± 0.96) , (26.91 ± 0.95) , (25.93 ± 0.75) °C]; 倒卵形树冠形态的乔木在集中块状式布局时日均气温最高 (26.45 ± 0.91) °C, 规则散点式时最低 (25.84 ± 0.81) °C。日均湿度方面, 圆柱形、圆球形、倒卵形和倒三角形树冠形态的乔木在规则散点式布局时日均湿度最高(分别为 $49.91\% \pm 3.49\%$, $49.31\% \pm 3.70\%$, $51.03\% \pm 3.11\%$, $50.93\% \pm 2.77\%$), 三角形树冠的乔木在自然集群式布局时日均湿度最高 $(49.10\% \pm 3.70\%)$ 。圆球形、倒卵形和三角形在集中块状式布局时日均湿度最低(分别为 $48.47\% \pm 3.43\%$, $49.09\% \pm 3.19\%$, $48.46\% \pm 3.40\%$), 圆柱形和倒三角形树冠的乔木在自然集群式布局时日均湿度最低(分别为 $49.15\% \pm 3.67\%$, $50.03\% \pm 3.52\%$)。

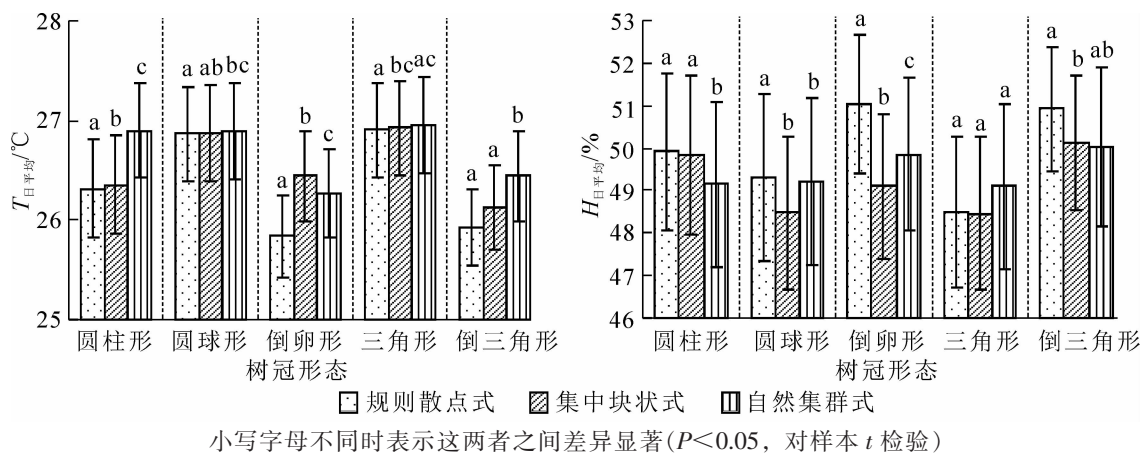


图 4 不同布局形式工况的日均温湿度比较

Figure 4 Comparison of daily average temperature and humidity of simulated condition with different layout forms

2.2 林冠下方区域的日均降温增湿强度

2.2.1 相同布局形式下不同树冠形态的植物群落日均降温增湿强度 相同布局形式下, 不同树冠形态的群落降温增湿强度之间有显著性差异($P < 0.05$)(图 5)。总体来看, 在 3 种布局形式下, 均是倒卵形或倒三角形树冠的群落日均降温增湿强度最大[分别为 (0.84 ± 0.15) °C/ $(2.52\% \pm 0.54)\%$, (1.16 ± 0.22) °C/ $(2.25\%$

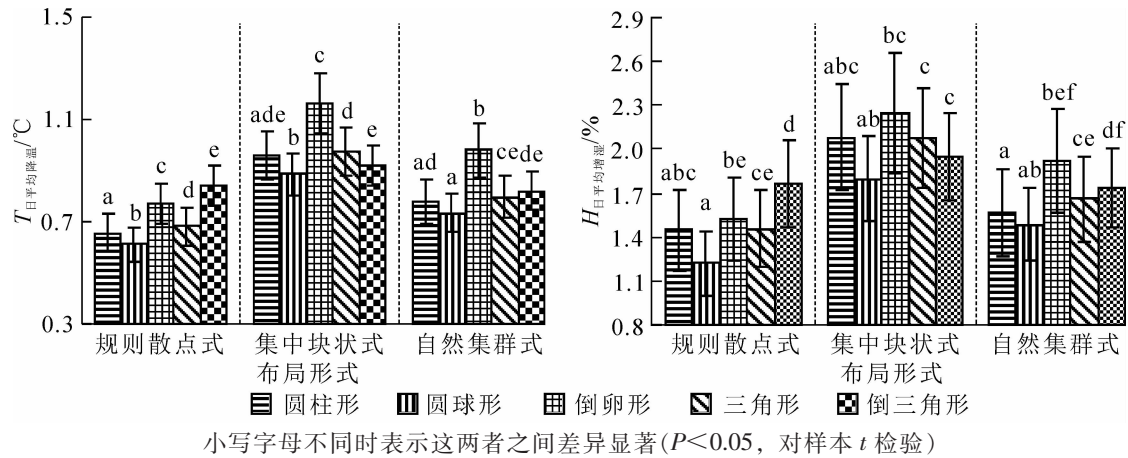


图5 不同树冠形态工况的日均降温增湿强度比较

Figure 5 Comparison of daily average cooling and humidification intensity of simulated condition with different canopy shapes

$\pm 0.78\%$), $(0.98 \pm 0.20) ^\circ\text{C}/(1.92\% \pm 0.67\%)$], 圆球形树冠最小[分别为 $(0.61 \pm 0.12) ^\circ\text{C}/(1.22\% \pm 0.42\%)$, $(0.88 \pm 0.15) ^\circ\text{C}/(1.80\% \pm 0.56\%)$, $(0.73 \pm 0.14) ^\circ\text{C}/(1.48\% \pm 0.47\%)$]。

2.2.2 相同树冠形态在不同布局形式下植物群落的日均降温增湿强度 从图6可以看出:布局形式对植物群落的日平均降温增湿强度具有显著的影响。总体来看,5种树冠形态都在集中块状式布局时日均降温增湿强度最大[分别为 $(0.96 \pm 0.18) ^\circ\text{C}/(2.08\% \pm 0.69\%)$, $(0.88 \pm 0.15) ^\circ\text{C}/(1.80\% \pm 0.56\%)$, $(1.16 \pm 0.22) ^\circ\text{C}/(2.25\% \pm 0.78\%)$, $(0.97 \pm 0.18) ^\circ\text{C}/(2.08\% \pm 0.65\%)$, $(0.92 \pm 0.15) ^\circ\text{C}/(1.95\% \pm 0.57\%)$]。除了倒三角形树冠的乔木群落在自然集群式布局时日均降温增湿强度最小以外[$(0.82 \pm 0.14) ^\circ\text{C}/(1.74\% \pm 0.51\%)$] ,其余4种树冠形态的群落都是在规则散点式布局时日均降温增湿强度最小[分别为 $(0.66 \pm 0.14) ^\circ\text{C}/(1.45\% \pm 0.52\%)$, $(0.61 \pm 0.12) ^\circ\text{C}/(1.55\% \pm 0.42\%)$, $(0.77 \pm 0.15) ^\circ\text{C}/(1.52\% \pm 2.54\%)$, $(0.68 \pm 0.14) ^\circ\text{C}/(1.46\% \pm 0.49\%)$]。说明集中块状式布局时群落的降温增湿效应最好。

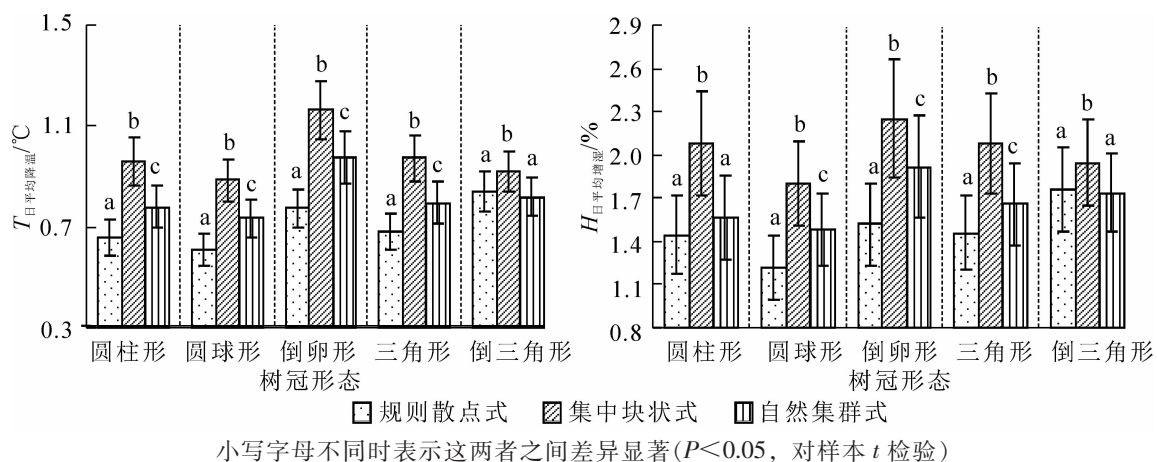


图6 不同布局形式工况的日均降温增湿强度比较

Figure 6 Comparison of daily average cooling and humidification intensity of simulated condition with different layout forms

2.3 整体区域的 PMV 指数

各模拟工况的日均 PMV 指数如图7所示。3种布局形式中,均是倒卵形或倒三角树冠形态的群落 PMV 指数最小(分别为 2.36 ± 0.24 , 2.36 ± 0.25 , 2.26 ± 0.24),圆球形树冠的群落 PMV 指数最大(分别为 2.66 ± 0.27 , 2.68 ± 0.27 , 2.36 ± 0.27),说明“上大下小”型(倒三角形和倒卵形)树冠群落中,人体热舒适感觉相对较好。相同的树冠形态在不同的布局形式时,虽然 PMV 指数排序各有不同,但总体来看,集中块状式布局时 PMV 指数相对较高(最大值为 2.68 ± 0.27),而自然集群式种植时 PMV 指数较小(最小值为 2.26 ± 0.25)。说明自然集群式栽植时人体热舒适体验更好。

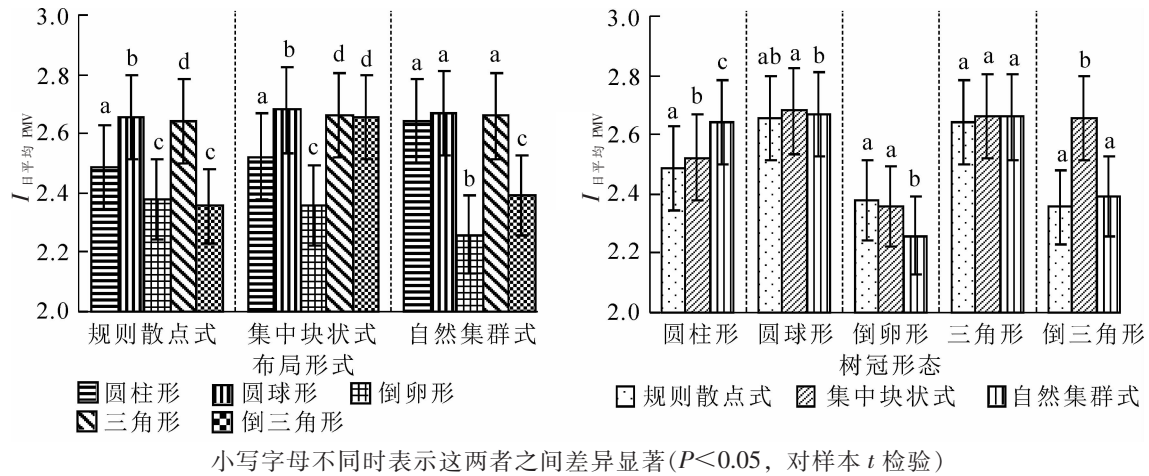


图 7 不同布局形式及树冠形态工况的日均 PMV 指数

Figure 7 Comparison of PMV of simulated condition with different layout forms and canopy shapes

3 讨论

3.1 树冠形态对降温增湿的影响

倒卵形和倒三角形这类“上大下小”型树冠的乔木群落对整体区域和林冠下方区域的降温增湿效果都表现最好，主要原因是“上大下小”型树冠的乔木能为林下提供更好的遮阳空间。吴翼^[9]对树木遮阳效果的研究中提出，树冠形态与遮阳位置(在平面和立面上)、阵幅宽窄、遮阳面大小有直接关系，且各类树木由于其形态不同，表现差别很大；一般横展性强的树木在为行人减免日晒的作用上有显著的优越性。吴力立等^[33]的研究也表明：树木在地面上影子的面积取决于树木的冠长、冠幅及太阳高度角，而与树木的高度关系不大，也就是与树木的形态有关。在高度一致的情况下，相比较其他形态的树冠，倒卵形和倒三角形树冠的冠幅更长，能为林下空间提供更好的遮阳效果。因此，在进行植物选择时，若想在夏季提供良好的降温增湿效益，可以多考虑“上大下小”型、树冠横展性强的乔木，如榉树、枫香、合欢、乌桕、七叶树等作为主要树种，而松柏类等三角形或圆球形树冠的乔木可在群落中搭配种植，提高林冠线及景观的丰富性。另外对乔木进行修剪时，也可考虑在尊重其原有树冠形态、确保植株正常生长的基础上，将植株适当修剪成“上大下小”型，进一步提高群落的降温增湿效果。

3.2 平面布局形式对降温增湿效果的影响

不同的平面布局形式对群落的降温增湿作用具有显著影响。规则散点式布局对整体区域的降温效果较好；集中块状式布局对整体区域的增湿效果及林下空间的降温增湿效益表现都比较好。因此在布局设计时，要根据实际情况合理选择植物布局形式。若要提高开阔的广场中整体区域的降温效果，缓解微尺度上城市热岛效应，可以选择规则散点排列的树阵式布局；在较为干旱的区域，可以通过集中块状布局，提高场地整体区域的湿度；如要加强林下区域的降温增湿效果，可优先选择集中块状式布局，提供大片连续的遮阴空间；若场地中有地形，不方便进行集中块状布局时，可以选择相对自然的集群式分布，更具有变化性，同时也能提供一定的增湿效果。

3.3 树冠形态和平面布局形式对人体热舒适度的影响

南京地区夏季高温高湿，虽然集中块状式布局时群落的降温增湿强度最高，但其 PMV 指数也相对最高，说明其在夏季虽然起到了很好的降温增湿效果，但这种布局形式的群落中，人体的热舒适体验却不是理想，反而自然集群式布局时 PMV 指数最低，热舒适体验更好。在树冠形态方面，倒卵形和倒三角形树冠的群落 PMV 值明显低于其他树冠，这与降温增湿效果的比较结果一致。所以考虑到人体热舒适度时，不能单纯以降温增湿效果作为衡量指标，尤其是在中国亚热带地区，夏季高温高湿，更应从人体舒适度角度，选择合适冠形的植物，并合理布局。

结合实际人群行为活动分别考虑，规则散点式布局时，热舒适度体验较好的区域较为分散，单个面积较小，林下适合布置小型的休憩区域，比如单人健身、棋牌类等相对分散且单个参与人数较少的活动；集中块状式布局时，热舒适度体验较好的区域较为集中，整体连接起来的面积较大且规整，适合参

与人数较多的活动;自然集群式布局时,热舒适度体验较好的区域也比较集中,整体面积较大但形状自由、边界松散,林下适合布置儿童游乐、素质拓展等随机性大,鼓励自由参与的活动设施。另外,热舒适度不仅与温湿度有关,还与风速^[34]、太阳辐射^[35]、人群行为活动^[36]以及游人心理^[37]等有关,这也将是未来微气候环境设计及热舒适度研究的重点方向。

本研究通过多种模拟工况比较得出乔木树冠形态和群落布局形式确实对温湿度有显著影响,虽是纯模拟研究,但部分结论也与其他学者的研究成果相契合,因此本研究对探讨如何改变群落自身结构特点来提高其微气候环境的降温增湿效益具有很好的参考价值。后续研究将与实际规划设计相结合,进一步修改周边环境因素,深入探讨群落自身结构与周边环境因子对微气候环境的双重影响。

4 参考文献

- [1] 陈自新, 苏雪痕, 刘少宗, 等. 北京城市园林绿化生态效益的研究(2)[J]. 中国园林, 1998, **14**(2): 51 – 54.
CHEN Zixin, SU Xuehen, LIU Shaozong, *et al.* Ecological benefits of urban landscaping in Beijing (2) [J]. *Chin Landscape Arch*, 1998, **14**(2): 51 – 54.
- [2] 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 Jiaomei, LI Shuhua, YANG Zhifeng. Temperature and humidity effect of urban green spaces in Beijing in summer [J]. *Chin J Ecol*, 2008, **27**(11): 1972 – 1978.
- [3] HATHWAY E A, SHARPLES S. The interaction of rivers and urban form in mitigating the urban heat island effect: a UK case study [J]. *Build Environ*, 2012, **58**(15): 14 – 22.
- [4] MOHAN M, KANDYA A, BATTIPROLU A. Urban heat island effect over national capital region of India: a study using the temperature trends [J]. *J Environ Prot*, 2011, **2**(4): 465 – 472.
- [5] 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 Zhong, LI Zhandong, CHENG Fangyun, *et al.* Cooling and humidifying effects of five landscape plant communities on summer days in Beijing [J]. *Sci Silv Sin*, 2016, **52**(1): 37 – 47.
- [6] 秦仲, 李湛东, 成仿云, 等. 夏季栎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 Zhong, LI Zhandong, CHENG Fangyun, *et al.* Impact of canopy structural characteristics on inner air temperature and relative humidity of *Koelreuteria paniculata* community in summer [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2015, **26**(6): 1634 – 1640.
- [7] 潘剑彬, 李树华. 北京城市公园绿地热舒适度空间格局特征研究[J]. 中国园林, 2015, **31**(10): 91 – 95.
PAN Jianbin, LI Shuhua. Study on spatial pattern of the function of thermal comfort improvement on Beijing city parks [J]. *Chin Landscape Arch*, 2015, **31**(10): 91 – 95.
- [8] 赵晓龙, 卞晴, 赵冬琪, 等. 寒地城市公园春季休闲体力活动强度与植被群落微气候调节效应适应性研究[J]. 中国园林, 2018, **34**(2): 42 – 48.
ZHAO Xiaolong, BIAN Qing, ZHAO Dongqi, *et al.* Research on the adaptability between the leisure physical activity intensity and micro-climate regulation of vegetation community of cold region parks in Spring [J]. *Chin Landscape Arch*, 2018, **34**(2): 42 – 48.
- [9] 吴翼. 树木遮荫与街道绿化[J]. 园艺学报, 1963, **2**(3): 295 – 308, 335 – 336.
WU Yi. Tree-shading and avenue-tree planting [J]. *Acta Hort*, 1963, **2**(3): 295 – 308, 335 – 336.
- [10] 高吉喜, 宋婷, 张彪, 等. 北京城市绿地群落结构对降温增湿功能的影响[J]. 资源科学, 2016, **38**(6): 1028 – 1038.
GAO Jixi, SONG Ting, ZHANG Biao, *et al.* The relationship between urban green space community structure and air temperature reduction and humidity increase in Beijing [J]. *Resour Sci*, 2016, **38**(6): 1028 – 1038.
- [11] 王明月. 基于微气候改善的城市景观设计[D]. 南京: 南京林业大学, 2013.
WANG Mingyue. *Urban Landscape Design for Improving the Microclimate* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2013.
- [12] KNEZ I, THORSSON S. Thermal, emotional and perceptual evaluations of a park: cross-cultural and environmental

- attitude comparisons [J]. *Build Environ*, 2008, **43**(9): 1483 – 1490.
- [13] 王振. 夏热冬冷地区基于城市微气候的街区层峡气候适应性设计策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
WANG Zhen. *Design Strategies for the Climate Adaptability of Street Canyon based on Urban Microclimate in Hot-summer and Cold-winter Zone* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [14] 陈卓伦. 绿化体系对湿热地区建筑组团室外热环境影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
CHEN Zhuolun. *Research of Vegetation System's Effects on Outdoor Thermal Environment of Residential Communities in Hot-humid Climate* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [15] 祝善友, 高牧原, 陈亭, 等. 基于 ENVI-met 模式的城市近地表气温模拟与分析: 以南京市部分区域为例 [J]. 气候与环境研究, 2017, **22**(4): 499 – 508.
ZHU Shanyou, GAO Muyuan, CHEN Ting, *et al.* Simulation and analysis of urban near-surface air temperature based on ENVI-met model: a case study in some areas of Nanjing [J]. *Clim Environ Res*, 2017, **22**(4): 499 – 508.
- [16] 薛思寒, 冯嘉成, 肖毅强. 岭南名园余荫山房庭园空间的热环境模拟分析[J]. 中国园林, 2016, **32**(1): 23 – 27.
XUE Sihan, FENG Jiacheng, XIAO Yiqiang. Research on the thermal environment simulation of the famous Lingnan Garden Yuyin Garden [J]. *Chin Landscape Arch*, 2016, **32**(1): 23 – 27.
- [17] 朱宇颐, 解潍嘉, 黄华国. 基于三维模型 ENVI-met 对黑河森林和北方森林的潜热及显热通量模拟[J]. 浙江农林大学学报, 2018, **35**(3): 440 – 452.
ZHU Yuyi, XIE Weijia, HUANG Huaguo. Modeling sensible flux and latent flux in Heihe and boreal forests based on a 3D ENVI-met model [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2018, **35**(3): 440 – 452.
- [18] 李京津, 王建国. 南京步行街空间形式与微气候关联性模拟分析技术[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, **46**(5): 1103 – 1109.
LI Jingjin, WANG Jianguo. Simulation analysis on relationship between spatial form and microclimate of pedestrian street in Nanjing [J]. *J Southeast Univ Nat Sci Ed*, 2016, **46**(5): 1103 – 1109.
- [19] 孙欣, 杨俊宴, 温珊珊. 基于 ENVI-met 模拟的城市中心区空间形态与热环境研究: 以南京新街口为例[C]//中国城市规划学会. 规划 60 年: 成就与挑战 2016 中国城市规划年会论文集(07 城市生态规划). 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 124 – 140.
- [20] 李笑寒, 胡聃, 韩风森, 等. 高层住宅小区建筑形态对微气象影响研究[J]. 生态科学, 2018, **37**(1): 178 – 185.
LI Xiaohan, HU Dan, HAN Fengsen, *et al.* The impact of architectural form on micrometeorology in high residential community [J]. *Ecol Sci*, 2018, **37**(1): 178 – 185.
- [21] 岳小智, 尹海伟, 孔繁花, 等. 基于 ENVI-met 的绿地布局模式对微气候的影响研究: 以南京市居住小区为例[J]. 江苏城市规划, 2018(3): 34 – 40.
YUE Xiaozhi, YIN Haiwei, KONG Fanhua, *et al.* The research about the influence of greenspace layout pattern on microclimate based on ENVI-met: taking residential communities in Nanjing as example [J]. *Jiangsu Urban Plann*, 2018(3): 34 – 40.
- [22] SHUDO H, SUGIYARMA J, YOKOO N, *et al.* A study on temperature distribution influenced by various land uses [J]. *Energy Build*, 1997, **26**(2): 199 – 205.
- [23] 赵昶淇. 南京滨江风光带植物景观研究与评价[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
ZHAO Changqi. *Research and Evaluation on Plant Landscape of Green Space in Nanjing Yangtse Riverside Scenic Belt* [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.
- [24] 杨骏. 南京城市绿地木本植物群落多样性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
YANG Jun. *Study on Diversity of Woody Plant Communities in Nanjing City Green Space* [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.
- [25] 吴博. 南京市社区公园植物景观研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
WU Bo. *Research on Plant Landscape of the Community Park in Nanjing* [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.
- [26] 王静. 南京城市公园绿地骨干树种调查研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
WANG Jing. *Investigation and Research on the Characteristic Trees and Shrubs of the Urban Park Green Space in*

- Nanjing [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009.
- [27] 吴秀臣. 南京绿道植物景观调查研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2015.
WU Xiuchen. *Investigation and Study of Plant Landscape in Nanjing Greenways* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2015.
- [28] 李珍. 南京城市湖滨公园植物景观研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2012.
LI Zhen. *Study on Plant Landscape of the Lakeside Park in the City of Nanjing* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2012.
- [29] 顾亚春. 南京郊野公园植物景观研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2012.
GU Yachun. *Research on Plant Landscape of Country Parks in Nanjing* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2012.
- [30] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2005 *ASHRAE Handbook: Fundamentals* [M]. Atlanta: ASHRAE, 2005: 1 – 12.
- [31] FANGER P O. *Thermal Comfort: Analysis and Application in Environmental Engineering* [M]. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.
- [32] BRUSE M, FLEER H. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model [J]. *Environ Mod Software*, 1998, **13**(3/4): 373 – 384.
- [33] 吴力立, 王宗淳. 树冠遮荫动态研究[J]. 南京林业大学学报, 1991, **15**(2): 61 – 66.
WU Lili, WANG Zongchun. A study on tree shadow movements [J]. *J Nanjing For Univ*, 1991, **15**(2): 61 – 66.
- [34] 冯娴慧. 城市绿地与风的环境效应研究[J]. 中国园林, 2010, **26**(2): 82 – 85.
FENG Xianhui. Study of the environmental effects of urban green space and wind [J]. *Chin Landscape Arch*, 2010, **26**(2): 82 – 85.
- [35] 李国杰. 基于热舒适度的哈尔滨步行街行道树优选研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
LI Guojie. *Research on Optimizing Street Trees of Harbin Pedestrian Street based on Thermal Comfort* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [36] 张德顺, 王振. 高密度地区广场冠层小气候效应及人体热舒适度研究: 以上海创智天地广场为例[J]. 中国园林, 2017, **33**(4): 18 – 22.
ZHANG Deshun, WANG Zhen. Micro-climate effect and human thermal comfort of square canopy in dense habitat: a case study of Shanghai Knowledge and Innovation Community Square [J]. *Chin Landscape Arch*, 2017, **33**(4): 18 – 22.
- [37] LENZHOLZER S. Thermal comfort experience in urban public space: case-studies on Dutch urban squares [J]. *Resour Conserv Recycl*, 2012, **64**: 39 – 48.
- [38] 张明丽, 秦俊, 胡永红. 上海市植物群落降温增湿效果的研究[J]. 北京林业大学学报, 2008, **30**(2): 39 – 43.
ZHANG Mingli, QIN Jun, HU Yonghong. Effects of temperature reduction and humidity increase of plant communities in Shanghai [J]. *J Beijing For Univ*, 2008, **30**(2): 39 – 43.