城市公园绿地植被群落郁闭度与三维绿量对夏季降温增湿效应的影响*

徐 欣 张 兴 高 飞 符文君 杨芷毓 刘 勇

苏州科技大学建筑与城市规划学院 苏州 215000

摘要：为充分利用城市公园绿地的降温增湿效应缓解城市热岛，文章基于苏州市典型城市公园绿地植被群落样方的实测，分析植被群落郁闭度和三维绿量等结构指标对夏季降温增湿效应的影响，得到植被群落结构配置的最优阈值。研究表明：不同群落结构的降温效应为乔-草型>乔-灌型或乔-灌-草型>灌-草型>草地型，增湿效应为乔-草型>乔-灌-草>乔-灌型>灌-草型>草地型；郁闭度和三维绿量对降温增湿效应均有明显影响，但郁闭度影响高于三维绿量。建议优先选择乔-草型绿地并合理控制植被群落的郁闭度和三维绿量在一定区间内，即郁闭度为 0.4~0.77，三维绿量大于 9 $m^3 \cdot m^{-2}$。

关键词：城市公园绿地；降温增湿；郁闭度；三维绿量

DOI：10.12169/zgcsly.2023.07.24.0003

Influence of Canopy Density and Tridimensional Green Biomass on Cooling and Humidification Effect of Vegetation Communities at Urban Green Spaces in Summer

Xu Xin Zhang Xing Gao Fei Fu Wenjun Yang Zhiyu Liu Yong

(School of Architecture and Urban Planning, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215000, China)

Abstract: In order to fully utilize the cooling and humidification effect of urban green space to mitigate the heat island effect in cities, the study selects and measures 20 sample plots from the typical vegetation communities in Suzhou's urban park green spaces to analyze the influence of structure indexes of vegetation community, such as canopy density and tridimensional green biomass, on the cooling and humidification effect of the communities in summer, and obtains the optimal threshold value of structure configuration of vegetation community. The results show that the cooling effect of different vegetation community structures could be ranked as the arbor-herb community > the arbor- shrub community or the arbor-shrub-herb multilayer community > the shrub-herb community > the herb community. The humidification effect is ranked as the arbor-herb community > the arbor-shrub-herb multilayer community > the arbor-herb community > the shrub-herb community > the herb community. Both the canopy density and the

收稿日期：2023-07-24

*基金项目：国家自然科学基金青年基金（52008280）；黑龙江省科学院双提雁阵项目（STYZ2022ZR01）；“十四五”江苏省重点学科建设项目资助（风景园林学）（082240006/002/003）；国家自然科学基金青年基金项目（52008280）；国家自然科学基金青年项目（52308029）；苏州市风景园林学会科研与科普专委会产学研课题“视听交互作用下苏州传统园林游览舒适度提升路径研究”；江苏省双创人才项目双创博士；黑龙江省博士后基金面上项目（LBH-Z23263）

第一作者：徐欣（1999- ），女，硕士生，研究方向为地域生态环境与景观规划。E-mail：1550680671@qq.com

通信作者：张兴（1968- ），男，博士，教授，研究方向为地域生态环境与景观规划。E-mail：1006598747@qq.com

tridimensional green biomass have obvious effects on the cooling and humidification effect of green spaces, but the canopy density has significantly higher influence than the tridimensional green biomass. In this sense, it is suggested that the green space of arbor-herb community with a canopy density of 0. 4-0. 77 and a tridimensional green biomass ≥ 9 $m^3 \cdot m^{-2}$ could be prioritized for the greatest cooling and humidification effect.

Keywords: urban green space; cooling and humidification effect; canopy density; tridimensional green biomass

近年来，快速城市化导致城市热岛效应加剧，降低了城市环境舒适度，也引起了学者的高度关注[1]。城市公园绿地是居民生活、休闲、游憩、户外活动的重要场所，其降温增湿的生态功能也是其他城市用地不可比拟的[2]。因此，越来越多的学者开始研究如何利用城市公园绿地的降温增湿效应减缓热岛效应。当前相关研究方法分为 3 类：一是在小尺度范围选取特定区域采用固定位置或移动观[3]；二是在大尺度空间范围内利用遥感技术进行区域性研究[4]；三是利用 ENVI-met 等软件对城市公园绿地热环境进行模拟研究。研究发现，城市公园绿地降温增湿的主要影响因素有 2 个方面：一是城市公园绿地内的植被群落特征，如群落结构、树种组成、郁闭度、三维绿量[5-6]、叶面积指数等；二是城市公园自身的特征[7]，如绿地和水体面积、形状、周长，下垫面类型等。虽然目前已有较多关于城市公园绿地降温增湿效应及影响因素的研究，但关于植被群落结构与降温增湿效应的定量分析研究还很少见，这导致城市植被结构优化配置决策与最优生态服务功能的结合缺乏可靠的数据支持。

本研究以苏州为代表的亚热带季风气候以及人为干扰较多的城市公园绿地为例，通过对苏州典型城市公园植被群落样方的实测，量化分析不同群落结构、郁闭度与三维绿量对降温增湿效应的影响，为植被群落结构的最优配置模式提供数据支持，对该地域的城市公园绿地设计具有现实指导意义。

1　研究区概况

苏州位于长三角中部，属于亚热带季风海洋性气候，全年平均气温 15.7 ℃。2022 年日极端最高气温≥35 ℃的高温日 51 天，明显高于常年平均高温天数 19 天。在对苏州市 55 个城市公园开展现场调研的基础上，选定新区公园作为研究样地。新区公园占地约 40 hm^2，建设完善、绿化类型丰富、使用率较高、植被群落稳定且养护条件良好，是具有代表性、典型性的苏州城市公园绿地之一。

2　研究方法

2.1　样地调查

通过对新区公园的深度调查，采取随机结合典型抽样原则，设置下垫层相似、不同配置模式的 20 个样方，样方大小为 10 m×10 m。样方内小气候条件基本稳定，边界距离道路、广场、建筑均至少有 10 m 的植被缓冲带，且水体距离相近，保证环境因子基本一致。选取包括乔-灌、乔-草、灌-草、乔-灌-草、草地 5 种群落结构配置类型，对照样方选择一块没有植物遮挡的开阔硬质铺装（表 1）。

样方调查分为两个步骤：首先，开展样方内的植物调查，记录其上、中、下层种类组成；其次，利用 CGQ-1 型测高仪和卷尺逐株测量乔木层和灌木层所有植物的树高、枝下高、植株南北和东西方向的冠幅、基径、胸径等特征，并记录其树冠形状；草地样方内记录所有草本植物的种类、高度、分盖度等特征。

选取前 3 日没有降雨、晴朗且风速小于 1 $m \cdot s^{-1}$ 的微风或无风天气进行气象观测。在 2022 年 9 月 17—19 日的 10：00—11：00，12：00—13：00，14：00—15：00 开展连续 3 日的气象观测[8]，同步观测样方的空气温度和相对湿度。实验所用的仪器为 DELIXI THM-01 温湿度计（温度测量范围为-20~60 ℃，温度测量精度±0.3 ℃，温度分辨度 0.1 ℃；湿度测量范围为 0%~100%RH，湿度测量精度为±3%RH，湿度分辨度 0.1%RH），读数 3 次取平均值，保留一位小数。

表 1 新区公园观测样方植被构成

样方编号	群落结构	植物种类调查	郁闭度	绿量密度/($m^3 \cdot m^{-2}$)
1	草地	狗牙根(*Cynodon dactylon*)、喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)、双穗雀稗(*Paspalum distichum*)	0	0
2	乔草	玉簪(*Hosta plantaginea*)、沿阶草(*Ophiopogon bodinieri*)、绣球(*Hydrangea macrophylla*)、樟(*Cinnamomum camphora*)	0.68	3.51
3	乔草	鸢尾(*Iris tectorum*)、樟、椴树(*Tilia tuan*)	0.78	13.46
4	灌草	地锦草(*Euphorbia humifusa*)、饭包草(*Commelina benghalensis*)、土牛膝(*Achyranthes aspera*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、山茶(*Camellia japonica*)、石楠(*Photinia serratifolia*)	0.74	1.93
5	乔灌草	沿阶草、铺地柏(*Juniperus procumbens*)、雪松(*Cedrus deodara*)	0.43	2.69
6	乔草	麦冬(*Ophiopogon japonicus*)、石楠、梧桐(*Firmiana simplex*)、银杏(*Ginkgo biloba*)、锐齿槲栎(*Quercus aliena*)	0.41	6.12
7	乔草	沿阶草、荷花木兰(*Magnolia grandiflora*)、雪松、深山含笑(*Michelia maudiae*)	0.66	5.87
8	草地	白车轴草(*Trifolium repens*)、双穗雀稗、狗牙根	0	0
9	乔草	沿阶草、蕙莲(*Zephyranthes candida*)、狗牙根、小叶黄杨(*Buxus sinica*)、樟、梧桐	0.68	14.73
10	乔灌草	铺地柏、金边黄杨(*Euonymus japonicus*)、石楠、乌桕(*Triadica sebifera*)、水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)	0.81	15.93
11	乔草	沿阶草、樱花(*Prunus serrulata*)	0.26	6.09
12	乔草	沿阶草、樟、榉树(*Zelkova serrata*)	0.94	18.42
13	乔灌	沿阶草、锦绣杜鹃(*Rhododendron pulchrum*)、榉树	0.73	12.33
14	乔灌草	狗牙根、三角槭(*Acer buergerianum*)、槐(*Styphnolobium japonicum*);女贞(*Ligustrum lucidum*)、荷花木兰	0.36	2.20
15	乔灌草	麦冬、紫薇(*Lagerstroemia indica*)、樟(*Cinnamomum camphora*)	0.45	7.54
16	乔灌草	蕙莲、麦冬、紫薇、樟、樱花	0.71	9.55
17	乔灌草	红花酢浆草(*Oxalis corymbosa*)、珊瑚树(*Viburnum odoratissimum*)、木樨(*Osmanthus fragrans*)、银杏、水杉	0.32	5.45
18	乔草	地锦草、樟、银杏、紫叶李(*Prunus cerasifera*)	0.86	22.48
19	乔草	麦冬、深山含笑、樟	0.55	10.35
20	乔草	麦冬、雪松	0.59	8.22
21	对照点		0	0

在样方对角线上的四等分点进行观测，观测点呈梅花式分布，离地面 1.5 m，如果观测点被阳光直射则将调整至距离四等分点最近的树荫下，同时在温湿度计传感器上加盖透明塑料罩作为防辐射处理。

2.2 数据处理

郁闭度采用样线法进行计算，即样地两对角线上树冠覆盖的总长度与两对角线的总长之比[9]。植被冠幅和冠高分别采用 x 和 y 表示，计算公式为：

$$x = \frac{x_1 + x_2}{2} \tag{1}$$

$$y = y_1 - y_2 \tag{2}$$

式（1）（2）中：x_1为东西方向的冠幅；x_2为南北方向的冠幅；y_1为树高；y_2为枝下高。

三维绿量是指所有生长植物茎叶所占据的空间体积。根据周廷刚等[10]建立的三维绿量模型计算出各样方乔木和灌木的三维绿量（表 2）。用植物占地面积乘以植物高度的方法计算绿篱灌木和草本植物的三维绿量。三维绿量密度是指单位面积群落样方上的三维绿量值。

表 2 三维绿量计算公式

序号	树冠形状	计算公式
1	卵形 OV	$\frac{\pi x^2 y}{6}$
2	圆锥形 CO	$\frac{\pi x^2 y}{12}$
3	球形 SP	$\frac{\pi x^2 y}{6}$
4	半球形 SS	$\frac{\pi x^2 y}{6}$
5	球扇 SF	$\frac{\pi(2y^3 - y^2\sqrt{4y^2 - x^2})}{3}$
6	球缺形 AS	$\frac{\pi(3x^2 y - 2y3)}{6}$
s7	圆柱形 BC	$\frac{\pi x^2 y}{4}$

注：x 为冠幅，y 为冠高。

植被群落的降温增湿效应分别采用平均降温百分率（T_p）和平均增湿百分率（H_p）表示，计算公式为：

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{T_{ci} - T_i}{T_{ci}} \times 100\%}{n} \tag{3}$$

$$H_p = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{H_i - H_{ci}}{H_{ci}} \times 100\%}{n} \tag{4}$$

式（3）（4）中：T_{ci}为对照样方第 i 时刻的温度值（℃）；T_i为群落样方第 i 时刻的温度值（℃）；H_{ci}为对照样方第 i 时刻的相对湿度值（%）；H_i为群落样方第 i 时刻的相对湿度值（%）；n 为记录时间段（n=9）。

采用 SPSS12.0 软件对数据进行相关性分析。通过二次曲线拟合分析，探求郁闭度和三维绿量密度与降温增湿效应之间的关系。为了进一步得出植被群落降温增湿效应的最佳配置模式，对郁闭度和三维绿量密度进行分级后（表 3），分别与降温、增湿效应进行多重比较分析。

表 3　郁闭度、三维绿量密度分级

级别	郁闭度	级别	绿量密度/($m^3 \cdot m^{-2}$)
Ⅰ	草地(郁闭度=0)	Ⅰ	草地(密度=0)
Ⅱ	0<郁闭度<0.4	Ⅱ	0<密度<3
Ⅲ	0.4≤郁闭度<0.5	Ⅲ	3≤密度<6
Ⅳ	0.5≤郁闭度<0.6	Ⅳ	6≤密度<9
Ⅴ	0.6≤郁闭度<0.7	Ⅴ	9≤密度<11
Ⅵ	0.7≤郁闭度<0.8	Ⅵ	12≤密度<15
Ⅶ	郁闭度≥0.8	Ⅶ	密度≥15

3　结果与分析

3.1　不同群落结构的降温增湿效应

由图 1 可知：不同群落结构降温率在 2.67%～9.64%，平均降温率 7.02%，其中乔-草型绿地降温率最高，为 9.64%，草地型绿地降温率最低，为 2.67%。不同群落结构增湿率在 11.10%～22.08%，平均增湿率 16.63%，其中乔-草型绿地的增湿率最高，为 22.08%，草地型绿地的增湿效率最低，为 11.10%。各个群落结构的降温和增湿效应变化趋势基本一致。复层结构植被群落降温增湿效应高于单一层级植被群落，其中乔-草型绿地的降温增湿效应均最高。

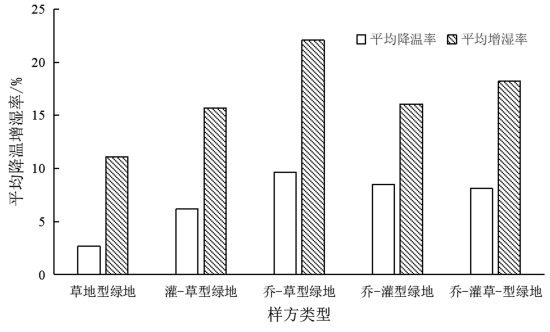


图 1　苏州公园绿地不同植被群落结构的降温增湿效应

3.2　城市公园绿地降温增湿效应的影响因素

3.2.1　降温效应的影响因素

由表 4 可知，郁闭度和降温率呈极显著正相关（$P<0.01$），三维绿量密度和降温率也呈极显著正相关（$P<0.01$），但郁闭度对降温效应的影响更大一些。

表 4　公园绿地植被群落郁闭度和三维绿量密度与降温增湿率的相关性分析

项目	郁闭度	三维绿量密度
降温率	0.852**	0.789**
增湿率	0.807**	0.771**

注：* $P<0.05$，** $P<0.01$。

为了进一步分析郁闭度和三维绿量密度对降温效应的影响，分别对其进行二次曲线拟合。结果（图 2）表明，郁闭度对降温率有显著影响（$F=31.091$，$P=0.000<0.01$）。随着郁闭度的增大，降温率也不断增大，但是当郁闭度接近 0.77 时，拟合曲线越来越平缓，降温幅度越来越小；当郁闭度等于 0.77 时，降温效应达到最大，不再有明显增加，这说明不是郁闭度越大，降温效应就越大。三维绿量密度对降温率也有显著影响（$F=14.568$，$P=0.000<0.01$），随着三维绿量密度的增大，降温率也不断增大（图 3）。

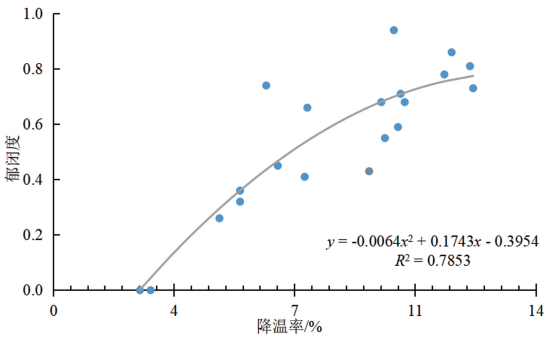


图 2　苏州公园绿地观测样地降温率与郁闭度的关系

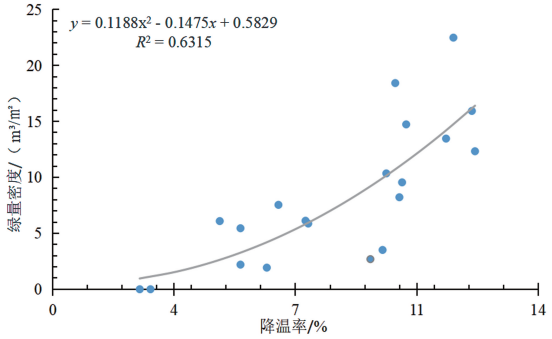


图 3　苏州公园绿地观测样地降温率与三维绿量的关系

为了探究绿地群落郁闭度和三维绿量密度的每个级别之间降温效应的差异，以草地为对照（郁闭度为 0，三维绿量密度为 0）进行多重比较分析。结果（表 5）发现，在郁闭度分级中，级别Ⅲ～Ⅶ与级别Ⅰ有显著差异（$P<0.05$），这意味着当郁闭度≥0.4 时，植被群落才具有明显的降温效应，并且随着郁闭度的继续变大，降温效应不在显著变大。

在三维绿量密度分级中，级别Ⅱ～Ⅶ与级别Ⅰ有显著差异（$P<0.05$）；级别Ⅴ～Ⅶ与级别Ⅱ～Ⅳ有显著差异（$P<0.05$），这意味着为了使植被群落的降温效应达到最大，三维绿量密度至少达到 9 $m^3 \cdot m^{-2}$。这说明发挥植被群落最佳降温效应的配置模式要求郁闭度的下限值为 0.4，上限值为 0.77，且三维绿量密度≥9 $m^3 \cdot m^{-2}$。因此，当提高郁闭度不能提高降温效应时，可以通过提高三维绿量增强降温效应。

表 5 不同等级郁闭度、三维绿量密度的苏州公园绿地降温率多重比较

郁闭度级别	N	降温率	三维绿量密度级别	N	降温率
Ⅰ	2	2.67±0.22c	Ⅰ	2	2.67±0.22c
Ⅱ	3	5.22±0.34bc	Ⅱ	3	6.92±1.98b
Ⅲ	3	7.65±0.55ab	Ⅲ	3	7.43±2.05b
Ⅳ	2	9.81±0.27a	Ⅳ	4	7.15±2.16b
Ⅴ	3	9.69±1.98a	Ⅴ	2	9.85±0.32a
Ⅵ	4	9.94±2.33a	Ⅵ	3	11.9±0.49a
Ⅶ	3	11.17±1.15a	Ⅶ	3	11.17±1.15a

注：N 代表样本量，不同小写字母表示不同级别差异显著（$P<0.05$），下同。

3.2.2 增湿效应的影响因素

从表 4 可知，郁闭度和增湿率呈极显著正相关（$P<0.01$），三维绿量密度和增湿率也呈极显著正相关（$P<0.01$），且郁闭度对增湿效应的影响比三维绿量密度更大。

同样，为了深入分析郁闭度和三维绿量密度对增湿效应的影响，建立二次曲线拟合。结果（图 4）表明，郁闭度对增湿率有显著影响（$F=16.725$，$P=0.000<0.01$）。随着郁闭度的增大，增湿率也不断增大，但是当郁闭度接近 0.81 时，拟合曲线越来越平缓；当郁闭度等于 0.81 时，增湿效应达到最大，不再有明显增加，这意味着郁闭度大于 0.81，对植被群落增湿效应没有提高。三维绿量密度对增湿率有显著影响（$F=16.871$，$P=0.000<0.01$）。随着三维绿量密度的增大，平均增湿百分率也不断增大，但其关系不是线性变化的，在三维绿量密度较小时，增湿效应增速较小；随着三维绿量密度变大，增湿效应增速也随之变大（图 5）。

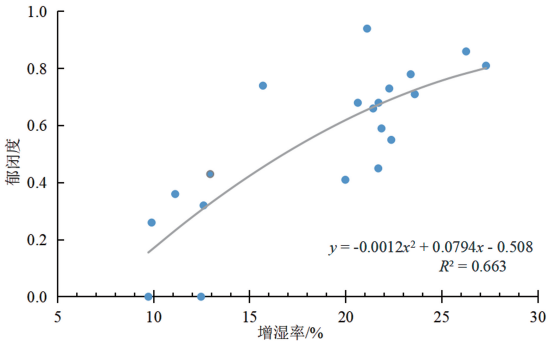


图 4 苏州公园绿地观测样地增湿率与郁闭度的关系

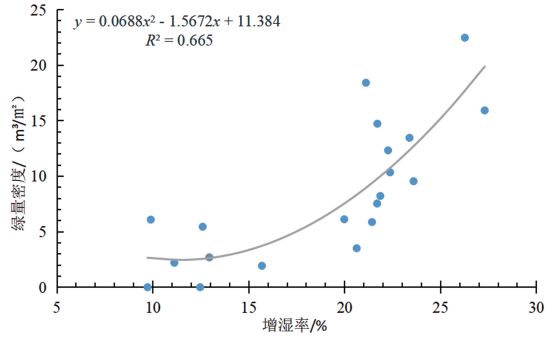


图 5 苏州公园绿地观测样地增湿率与三维绿量的关系

为了探究绿地群落郁闭度和三维绿量密度每个级别之间增湿效应的差异，以草地为对照（郁闭度为 0，三维绿量密度为 0）进行多重比较分析。结果（表 6）发现，在郁闭度分级中，级别Ⅳ～Ⅶ差异不显著，但与级别Ⅰ～Ⅱ有显著差异。这意味着当郁闭度≥0.5 时，植被群落才具有明显的增湿效应。

在三维绿量密度分级中，级别Ⅰ～Ⅳ之间没有显著差异，级别Ⅲ～Ⅶ也没有显著差异，但级别Ⅰ～Ⅱ与级别Ⅴ～Ⅶ有显著差异（$P<0.05$），这意味着当绿地群落三维绿量密度达到3 $m^3 \cdot m^{-2}$以上时，才能有效发挥植被群落的增湿效应。综上所述，发挥植被群落最佳增湿效应的配置模式，要求郁闭度下限值为 0.5，上限值为 0.81，且三维绿量密度≥3 $m^3 \cdot m^{-2}$。所以，当提高郁闭度对

增湿效应不显著时，可以通过增加三维绿量来增强增湿效应。

表 6　不同等级郁闭度、三维绿量密度的苏州公园绿地增湿率多重比较

郁闭度级别	*N*	增湿率	三维绿量密度级别	*N*	增湿率
Ⅰ	2	11.1±1.94c	Ⅰ	2	11.1±1.94b
Ⅱ	3	11.2±1.35c	Ⅱ	3	13.25±2.3b
Ⅲ	3	18.2±4.64b	Ⅲ	3	18.22±4.88ab
Ⅳ	2	22.11±0.36ab	Ⅳ	4	18.36±5.71ab
Ⅴ	3	21.25±0.56ab	Ⅴ	2	22.98±0.86a
Ⅵ	4	21.23±3.74ab	Ⅵ	3	22.45±0.85a
Ⅶ	3	24.89±3.32a	Ⅶ	3	24.89±3.32a

4　讨论

本研究中，乔-草型绿地的降温增湿效应最强，乔-灌-草型绿地次之，而在前人研究中，一般是乔-灌-草型绿地具有最强的降温增湿效益[11]，推测可能是由于苏州夏季温度高、湿度大，乔-灌-草型植被群落由于郁闭度较高，导致冠层内部的空气不流通，使样方内变得闷热。而乔-草型植被群落，在乔木遮挡的同时，中间区域的空气通透，便于通风，带走水分，减少相对湿度，从而起到更好的降温效应[12]。

郁闭度能很好地表示植物冠层的遮蔽程度[13]。三维绿量作为植物绿色三维体积和叶面积指数的植物指标可以揭示植物生态功能效应。相关研究表明，植物树冠的遮荫作用是实现降温增湿效应的最重要手段[14]，这与本研究的结论一致。因此，在城市公园绿地设计阶段，应优先关注植被群落的郁闭度，以此获得更好的降温增湿效应。其次，由于人为干扰较多，尤其植被群落经过人工修剪，叶面积指数扩大，会出现三维绿量相同，郁闭度不同的现象，因此，也应对植被群落的郁闭度更加重视，保证郁闭度在最佳阈值内。肖湘东等[15]发现，三维绿量和温度差并不是呈现线性正相关关系，在乔-灌-草群落中，三维绿量<200 m^3或>800 m^3是降温效应较佳数值范围。朱春阳等[16]研究发现，郁闭度超过 44%时，降温增湿效应显著；当郁闭度超过 67%时，降温增湿效应显著且趋于稳定。高吉喜等[11]发现，当群落郁闭度达到 50%时，降温增湿效应才会明显显现；当郁闭度大于 85%时，绿地的降温增湿效应将不再明显增加。这与本研究分析得到的结论类似，说明植被群落的郁闭度和三维绿量等因子对降温增湿效应的影响是复杂的，在新建或改造城市公园绿地时不能一味地增加植被群落郁闭度和三维绿量，否则对降温增湿效应适得其反。在前人的研究中，北京群落郁闭度在 0.60~0.85 时，三维绿量密度大于 5 $m^3 \cdot m^{-2}$的植被群落是能够发挥最佳降温增湿功能的城市绿地群落配置模式[11]。与其相比，本研究郁闭度上、下限均有所降低，三维绿量密度下限有所提高，这推测是因为不同研究区域的植物种类不同，蒸腾作用的大小也有所差异，所以能够发挥最大降温增湿效应的城市公园绿地群落配置模式在各个地域也有所不同，这就意味着应该因地制宜针对不同气候类型和植物种类的地域构建不同的植被群落配置模式。因此，从增强城市公园绿地降温增湿效应的角度出发，建议采用复层结构的植被群落，在满足郁闭度一定范围的条件下，增加三维绿量。

本研究的结论是基于对 20 个样方的降温增湿平均百分率分析所得，为验证结论，需增加更多样方的观测数据；受限于观测仪器、实验人员等因素，只选取了一个公园绿地作为研究对象，在考虑降温增湿效应的同时，还需增加更多样地观测结果加以验证；距离市中心的远近也有可能对降温增湿效应产生影响；本研究无法同时观测每个样方的空气温度和相对湿度，有可能导致观测数据的误差；同时受限于时间和精力，只选取夏季典型高温高湿天气对城市公园植被群落进行研究，没有比较春夏秋冬 4 个季节植被群落降温增湿效应有何差异[17]；除了群落结构、郁闭度、三维绿量以外，研究区域气候类型[18]、景观指数[19]、绿地类型[20]、绿地形状[21]、绿地面积、植物种植形式及空间布局[22]等都有可能对降温增湿效应产生影响，可在后续深入研究中推进。

5　结论

研究实测苏州 20 个典型城市公园绿地样方群落结构、空气温度与相对湿度，分析了郁闭度与三维绿量对降温增湿效应的影响，为提供最大生态服务功能的群落优化配置模式奠定基础，结论如下：1）不同群落结构的降温效应为乔-草型>

乔-灌型或乔-灌-草型>灌-草型>草地型，增湿效应为乔-草型>乔-灌-草>乔-灌型>灌-草型>草地型。2）郁闭度和三维绿量对绿地降温增湿效应均有明显影响，但郁闭度影响高于三维绿量。3）郁闭度和三维绿量密度都与降温增湿效应存在一定的正相关关系，但都不是简单的线性关系；能起到降温增湿效应的植被群落郁闭度和三维绿量密度都有一定的下限值，同时郁闭度有一定的上限值。

参考文献

[1]郝又佳,陈岚,谭林,等.基于局地气候分区的成都街道空间冬季热舒适研究[J].中国城市林业,2023,21(1):27-36.

[2]黄海静,魏林颖.湿热地区老年人公园热舒适的环境因素[J].中国城市林业,2023,21(1):13-19.

[3]BAO Y,GAO M,LUO D,et al.The influence of plant community characteristics in urban parks on the microclimate[J].Forests,2022,13(9):1342.

[4]KLOK L,ROOD N,KLUCK J,et al.Assessment of thermally comfortable urban spaces in Amsterdam during hot summer days[J].International Journal of Biometeorology,2019,63(2):129-141.

[5]杨英书,胡希军,金晓玲,等.三维绿量空间分布对植物群落夏季降温增湿效果的影响:以怀化市公园绿地为例[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2022,48(2):181-189.

[6]郑俊鸣,朱丹丹,蒋梦莹,等.福州市3个山地公园三维绿量与其影响因子特征研究[J].中国园林,2018,34(2):89-93.

[7]刘春玲.夏季城市公园绿地的降温增湿效应:以北京奥林匹克公园为例[D].北京:北京林业大学,2019.

[8]全国气候与气候变化标准化技术委员会.气候季节划分 GB/T 42074-2022[S].北京:中国标准出版社,2022.

[9]李永宁,张宾兰,秦淑英,等.郁闭度及其测定方法研究与应用[J].世界林业研究,2008,21(1):40-46.

[10]周廷刚,罗红霞,郭达志.基于遥感影像的城市空间三维绿量(绿化三维量)定量研究[J].生态学报,2005,25(3):415-420.

[11]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.

[12]YU Q Y,ACHEAMPONG M,PU R L,et al.Assessing effects of urban vegetation height on land surface temperature in the City of Tampa,Florida,USA[J].International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2018,73:712-720.

[13]YAN H,FAN S X,GUO C X,et al.Assessing the effects of landscape design parameters on intra-urban air temperature variability:the case of Beijing,China[J].Building and Environment,2014,76:44-53.

[14]刘莹莹,肖湘东,过昱辰,等.五种常见群植小乔木对降温增湿效应和 $PM_{2.5}$ 消减效应的研究[J].北方园艺,2016(2):74-77.

[15]肖湘东,陈国凤,董丽,等.华东热湿地区四种植物群落类型对降温效应的影响研究[J].风景园林,2019,26(2):94-99.

[16]朱春阳,李树华,纪鹏.城市带状绿地结构类型与温湿效应的关系[J].应用生态学报,2011,22(5):1255-1260.

[17]卫笑,张明娟,魏家星,等.春夏秋三季不同类型植物群落的温湿度调节效应研究:以南京滨江公园为例[J].中国城市林业,2018,16(3):21-25.

[18]胡梦玲.干旱区典型公园植物群落环境效应研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2021.

[19]WEI J X,LI H B,WANG Y C,et al.The cooling and humidifying effects and the thresholds of plant community structure parameters in urban aggregated green infrastructure[J].Forests,2021,12(2):111.

[20]ARAM F,HIGUERAS GARCÍA E,SOLGI E,et al.Urban green space cooling effect in cities[J].Heliyon,2019,5(4):e01339.

[21]燕海南,曹雅男.城市公园绿地夏季降温增湿效应[J].中国城市林业,2021,19(4):91-96.

[22]朱思媛.杭州城北体育公园夏季温湿度变化研究[D].杭州:浙江农林大学,2018.