浙 江 农 林 大 学 学 报，2019，**36**(3)：550–556
Journal of Zhejiang A&F University
doi:10.11833/j.issn.2095-0756.2019.03.016

北京城市森林冠层结构对夏季林内舒适度的影响

金桂香[1]，刘海轩[1]，卢泽洋[2]，吴　鞠[1]，许丽娟[1]，孙广鹏[1]，李　苹[1]，李　军[1]，徐程扬[1]

（1. 北京林业大学 林学院，北京 100083；2. 国家林业和草原局 调查规划设计院，北京 100714）

摘要：于 2013–2016 年 7–8 月，利用小气象站观测北京城市森林小气候特征，研究了城市森林冠层结构对人体舒适度的影响。结果表明：①叶面积指数(I_{LA})(r=–0.314, P=0.002)，平均叶倾角 (A_{MT})(r= 0.472, P<0.001)，冠层厚度(H_{CT})(r=0.458, P<0.001)，冠下高(H_{CB})(r=0.692, P<0.001)和冠高比(R_{CT})(r=0.254, P=0.014)与林下舒适度(S)显著或极显著相关，其中平均叶倾角、冠层厚度、冠下高与林下舒适度相关性较高；叶面积指数 (r=–0.356, P=0.001)，冠高比(r=0.433, P<0.001)和冠层通透度(P_C)(r=0.738, P<0.001)与舒适变化强度(d_S)极显著相关，其中冠高比和冠层通透度与舒适变化强度的相关性较高。②利于提高舒适度的平均叶倾角、冠层厚度和冠下高的取值区间分别为 27.48°±1.67°，(7.40±0.09) m 和(2.67±0.06) m；使林内舒适度优于林外的冠高比和冠层通透度取值区间分别为 0.72±0.003 和 6.51%±0.884%。③平均叶倾角和冠下高的协同作用对林下舒适度的解释程度为 51.1%；冠高比和冠层通透度的协同作用对舒适变化强度的解释程度为 55.5%。林内舒适度受多个结构指标共同影响，单一指标无法准确预测林内舒适度，如何构建与林内舒适度拟合优度较高的综合结构指数还有待进一步研究。图 5 表 5 参 19

关键词：城市森林；降温效应；冠层结构；叶面积指数；舒适度

中图分类号：S716.2　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2095-0756(2019)03-0550-07

Canopy structures and degree of comfort with urban forests of Beijing in summer

JIN Guixiang[1], LIU Haixuan[1], LU Zeyang[2], WU Ju[1], XU Lijuan[1], SUN Guangpeng[1], LI Ping[1], LI Jun[1], XU Chengyang[1]

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Academy of Forest Inventory and Planning, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China)

Abstract: To identify the major structural factors affecting the degree of comfort so as to optimize the structure of urban forests, the effects of canopy structures on the degree of comfort were studied. Microclimate characteristics in urban forests of Beijing were observed with mini weather stations between July and August from 2013–2016, and correlation analysis and regression analysis were used to evaluate the data. Results indicated that (1) human comfort (S) was significantly or highly significantly correlated to leaf area index (I_{LA}) (r=–0.314, P=0.002), mean tilt angle (A_{MT}) (r=0.472, P<0.001), canopy thickness (H_{CT}) (r=0.458, P<0.001), height of canopy bottom (H_{CB}) (r=0.692, P<0.001), and ratio of canopy thickness to tree height (R_{CT}) (r=0.254, P=0.014). The intensity of comfort (d_S) was highly significantly correlated to I_{LA} (r= –0.356, P=0.001), R_{CT} (r= 0.433, P<0.001), and permeability of canopy (P_C) (r=0.738, P<0.001). (2)The appropriate ranges to improve comfort were 27.48° ±1.67° for A_{MT}, (7.40 ± 0.09) m for H_{CT}, and (2.67 ± 0.06) m for H_{CB}. To make comfort inside the forest better than outside, the appropriate range of R_{CT} was 0.72 ± 0.003 and for P_C was 6.51%±0.884%. (3) By regression analysis, the interpretation of A_{MT} and H_{CB} to S was 51.1%; whereas, the interpretation of R_{CT} and P_C to d_S was 55.5%. The degree of comfort of urban forest is affected by multiple struc-

收稿日期：2018-05-10；修回日期：2018-09-30

基金项目：国家林业公益性行业科研专项(20140430102)

作者简介：金桂香，博士研究生，从事城市林业研究。E-mail: yinzhu427@sina.com。通信作者：徐程扬，教授，博士，博士生导师，从事城市林业、生态林培育相关研究。E-mail：cyxu@bjfu.edu.cn

tural indicators. Single structure cannot accurately predict the comfort degree in the forest. How to construct the comprehensive structure index fitting highly to the comfort degree in the forest remains to be further studied. [Ch, 5 fig. 5 tab. 19 ref.]

Key words: urban forests; cooling effect; canopy structures; leaf area index; comfort degree

受气候变化及快速城市化进程影响，城市热岛效应已成为近年来全球研究的热点，而改善城市空间布局[1]、优化城市森林结构[2-4]是解决热岛效应问题的重要途径。如何提高人体舒适度，科学营建城市森林已成为城市森林建设中亟待解决的问题，因此，理清城市森林结构与人体舒适度的关系具有重要意义。目前，关于城市森林舒适度的研究主要以类型间和不同地段间比较为主[5-6]，很少建立城市森林结构与降温强度或人体舒适度之间的数量关系[7-10]。有限的研究结果表明：城市森林冠层结构与人体舒适度显著相关[6-7]，郁闭度、叶面积指数等结构参数可解释温度变化的 60%以上[8-9]，但对舒适度的解释程度只有 20%~30%[10]。那么，复杂结构林分中人体舒适度是否受多个结构指标共同影响，哪些指标是影响舒适度的主导因素？本研究以这些问题为导向，选取 6 个城市森林冠层结构指标，研究这些结构指标与人体舒适度的关系，旨在筛选对舒适度解释程度较高的指标，确定林分舒适结构，为优化城市森林结构提供参考。

1　样地布设

在朝阳公园、海淀公园、奥体公园、元大都遗址公园、八家郊野公园、奥林匹克森林公园等典型北京城市公园内选取以乔木为主，并能为游人提供游憩空间的典型阔叶林分布设 20 m × 20 m 的样方，并在距林缘 20 m 处的林外空地设置对照点。试验共设置 1 444 个样方，基本涵盖北京市城市公园主要林分类型。

2　研究方法

2.1　冠层结构指标选择及数据获取

参考前人研究结果[9-11]，本研究选取叶面积指数(leaf area index, I_{LA})，平均叶倾角(mean tilt angle, A_{MT})，冠层厚度(canopy thickness, H_{CT})，冠下高(height of canopy bottom, H_{CB})，冠高比(ratio of canopy thickness to tree height, R_{CT})和冠层通透度(the permeability of the canopy，P_C)等 6 个冠层结构简单指标。其中，叶面积指数和平均叶倾角采用 LAI-2200 型冠层分析仪(Li-cor, 美国)直接测定，分别表征单位面积上覆盖的叶片总面积和叶片与水平面的平均夹角；冠层厚度指林木树高与冠下高差值的均值，表征叶片在垂直空间中的分布状况；冠下高指林分平均活枝下高，表征冠下空间大小；冠高比为冠层厚度与平均树高的比值，表征冠层和林下空间的协调程度；冠层通透度为林内平均照度和林外照度的比值，表征冠层透光程度以及叶片在冠层水平方向上分布的均匀程度。

于 2013-2016 年 7-8 月的典型晴天(表 1)，对样方林分基本结构进行调查，选取 1 d 中气温较高时段(10:00-16:00)对样地林内外气象因子和光照强度进行监测。其中林分基本结构包括树高、胸径、冠幅、第一活枝下高、叶面积指数、平均叶倾角等。采用 Kestrel 4000(Kestrel, 美国，温度精度±1.0 ℃，湿度精度±3%，风速精度±3%)记录林内外空气温、湿度和风速，各个样方采集 30 min，并采用照度计

表 1　试验期间(7-8 月)天气状况

Table 1　Weather conditions during experimental period (July-August)

年份	晴天天数/d	平均日最高气温/℃	平均日最低气温/℃	测量时段平均气温/℃		气温日较差/℃	风速/级
				林内	林外		
2013	16	35.0	23.0	32.2	32.9	12.0	≤3
2014	19	34.0	23.0	30.4	30.6	11.0	≤3
2015	11	33.0	21.0	29.4	30.1	12.0	≤3
2016	18	32.0	22.0	30.7	33.6	10.0	≤3

说明：测量时段平均气温为样地及对照点测得的平均气温，其他数据来自天气后报 http://www.tianqihoubao.com。只统计晴天天气的平均值

(HT-8318)测定林内外光照条件(其中测得照度的样方共 558 个)。

2.2 舒适度指标计算及分级

本研究选取群落舒适度评价指标[12]综合评价城市森林林内外舒适度。$S=0.6\times(|T-24|)+0.07\times(|H_R-70|)+0.5\times(|v-2|)$。其中：$S$ 是综合舒适度指标，在本研究中代表林下舒适度，S 越小代表林下舒适度越高；T 为平均气温(℃)；H_R 为空气相对湿度(%)；v 是平均风速($m\cdot s^{-1}$)。以 d_S 表示舒适变化强度，表征林分提高舒适度的能力。d_S 越小代表林分提高舒适度的能力越强。表达如下：$d_S=(S_1-S_2)/S_2$。其中：S_1 为林内舒适度，S_2 为林外舒适度。

为便于分析，将 S 和 d_S 进行分组(表 2)。其中 S 等级划分及描述参考黄良美等[12]的研究；d_S 等级划分参考文献[7,10,12-13]，并通过专家打分的方式，最终划分为 6 个等级。

表 2 舒适度指标等级划分标准

Table 2 Grading standards for confort indices

林下舒适度(S)			舒适变化强度(d_S)		
等级	范围	舒适描述	等级	范围	舒适描述
1	$S\leqslant4.55$	舒适	1	$d_S\leqslant-0.2$	S_1 小于 S_2，且差距大于等于 0.2 倍 S_2
2	$4.55<S\leqslant6.95$	较为舒适	2	$-0.2<d_S\leqslant-0.1$	S_1 小于 S_2，且差距在 0.1 倍 S_2 到 0.2 倍 S_2
3	$6.95<S\leqslant9.00$	不舒适	3	$-0.1<d_S\leqslant0$	S_1 小于 S_2，且差距在 0 到 0.1 倍 S_2
4	$S>9.00$	极不舒适，难以忍受	4	$0<d_S\leqslant0.1$	S_1 大于 S_2，且差距在 0 到 0.1 倍 S_2
			5	$0.1<d_S\leqslant0.2$	S_1 大于 S_2，且差距在 0.1 倍 S_2 到 0.2 倍 S_2
			6	$d_S>0.2$	S_1 大于 S_2，且差距大于 0.2 倍 S_2

2.3 数据处理

为缩小指标绝对值并便于分析，所有冠层结构指标取对数处理。使用 SPSS 18.0 进行方差分析、回归分析，使用 Excel 2007 和 Origin 8.0 绘图。

3 结果与分析

3.1 北京城市森林林内舒适度

达到舒适的样方共有 735 个，占样方总数的 50.9%(图 1)，说明在炎热的夏季，仍有 49.1%的林分不能达到舒适，可能是受林外环境等多重因素的影响。舒适度低于林外的样方有 70%，说明林分的存在显著增加了公园活动空间的舒适程度。达到舒适的样方中，林内舒适优于林外的样方数共 466 个，占总数的 32.28%。

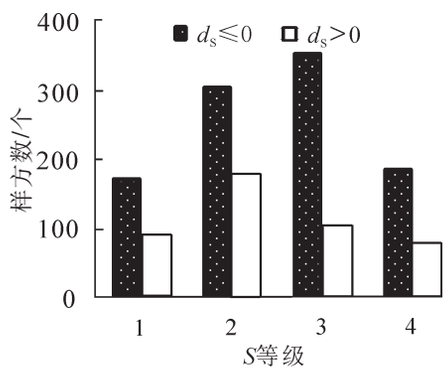


图 1 北京城市森林舒适度

Figure 1 Comfort degree in urban forests in Beijing

3.2 与舒适度相关的冠层结构指标筛选

叶面积指数、平均叶倾角、冠层厚度、冠下高、冠高比与林下舒适度呈显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)相关(表 3)。其中，冠下高与林下舒适度有较强的正相关关系($r=0.692$，$P<0.001$)。可能在高温高湿的夏季，冠层所形成的生态场对较小的林下空间影响力大[14]，同时较小的冠下空间有利于阻隔林外热空气，因此在高温时段较小的林下空间有利于提高林内的人体舒适度。平均叶倾角($r=0.472$，$P<0.001$)和冠层厚度($r=0.458$，$P<0.001$)与林下舒适度存在中度正相关关系，较低的平均叶倾角有利于阻隔垂直方向上的太阳辐射，减少林下显热通量，而冠层厚度大的城市森林虽然蒸腾潜力大，但不利于水蒸气散溢，增加了林下的相对湿度，因此在高温高湿的时段，厚冠层不利于提高林下舒适度。叶面积指数($r=-0.314$，$P=0.002$)和冠高比($r=0.254$，$P=0.014$)与林下舒适度呈弱相关关系，叶面积指数表征冠层的蒸腾能力，蒸腾作用强既降低温度又增加湿度，而增加湿度不利于舒适度的提高。冠高比受冠层厚度和冠下高影响，而 2 个指标的制衡关系使得冠高比对林下舒适度的代表性较低。

叶面积指数、冠高比和冠层通透度与舒适变化强度极显著($P<0.01$)相关(表 3)。冠层通透度与舒适变化强度存在较强的正相关关系($r=0.738$，$P<0.001$)，较低的冠层通透度使冠层阻隔垂直方向上的太阳

辐射能力较强，使得林内舒适度优于林外。冠高比与舒适变化强度存在中度正相关关系(r=0.433，P<0.001)，可能的原因为，在北京城市森林冠层厚度整体较高，降温效应较强的基础上，较低的冠高比适当增加了林下空间，有利于水汽散溢，减小湿度从而增大林内外舒适度的差异；叶面积指数与舒适变化强度的相关性较弱(r=–0.356，P=0.001)，可能因为降温和增湿对舒适度的提高有相反的影响。

选取与 S 和 d_S 存在中度以上相关关系的指标进一步分析冠层结构对林下舒适度和舒适变化强度的影响。

表 3　舒适度指标与冠层结构指标相关性

Table 3　Correlationship between canopy structures and comfort indices

指标	S		d_S	
	Pearson 相关系数(r)	P	Pearson 相关系数(r)	P
$\lg(I_{LA}+1)$	–0.314	0.002	–0.356	0.001
$\lg(A_{MI}+1)$	0.472	<0.001	0.018	0.710
$\lg(H_{CI}+1)$	0.458	<0.001	0.060	0.207
$\lg(H_{CB}+1)$	0.692	<0.001	0.073	0.125
$\lg(R_{CI}+1)$	0.254	0.014	0.433	<0.001
$\lg(P_C+1)$	0.051	0.348	0.738	<0.001

3.3　冠层结构指标对林下舒适度的影响

不同林下舒适度等级下各冠层结构指标差异极显著(P<0.001)(表 4)。等级 4 下的平均叶倾角显著(P<0.05)大于等级 1 下的平均叶倾角；等级 4 下的冠层厚度显著(P<0.05)大于等级 1，等级 2 和等级 3 下的冠层厚度；等级 4 下的冠下高显著(P<0.05)高于等级 1，等级 2 和等级 3 下的冠下高，等级 2 下的冠下高显著(P<0.05)高于等级 1 下的冠下高。

表 4　不同林下舒适度等级下冠层结构指标差异性分析

Table 4　Difference significanceof canopy structures in different grades of S

指标	林下舒适度等级				显著性	
	1	2	3	4	F	P
$\lg(A_{MI}+1)$	1.223 ± 0.049 b	1.408 ± 0.032 a	1.377 ± 0.034 ab	1.483 ± 0.038 a	7.517	<0.001
$\lg(H_{CI}+1)$	0.915 ± 0.010 b	0.905 ± 0.007 b	0.917 ± 0.007 b	0.955 ± 0.008 a	7.320	<0.001
$\lg(H_{CB}+1)$	0.558 ± 0.007 c	0.576 ± 0.004 b	0.585 ± 0.005 b	0.628 ± 0.006 a	25.226	<0.001

随着林下舒适度等级的提高，平均叶倾角、冠层厚度和冠下高都呈逐渐增加的趋势(图 2)。不同林下舒适度等级下，平均叶倾角数据分布较均匀，但各等级下均有少量极低值分布(图 2A)。可能平均叶倾角过低时虽然阻隔来自林冠上方的热辐射，但同时降低了垂直方向上的通风效果。总体来看，平均叶倾角降低有利于林下热舒适提高，但是过低的平均叶倾角对林下舒适没有代表性，利于林分舒适的平均叶倾角取值为 27.48°±1.67°。不同等级下的冠层厚度(图 2B)和冠下高(图 2C)数据分布均匀，较低的冠层厚度和冠下高有利于林下热舒适，利于林下舒适的冠层厚度和冠下高的取值分别为(7.40±0.09) m 和(2.67±0.06) m。

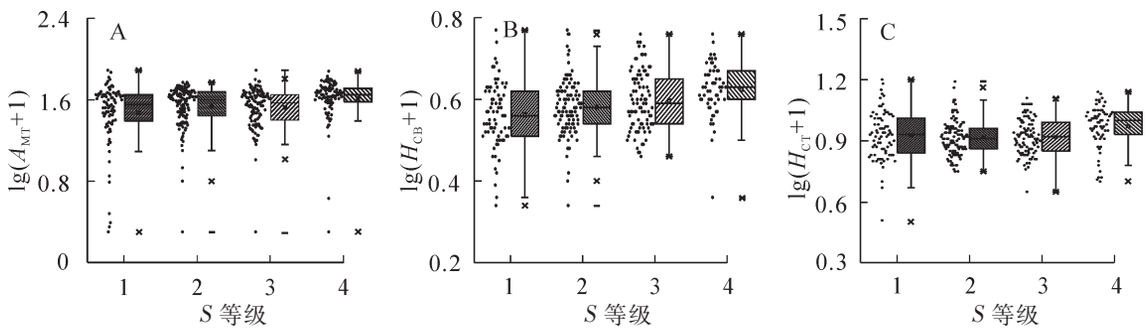
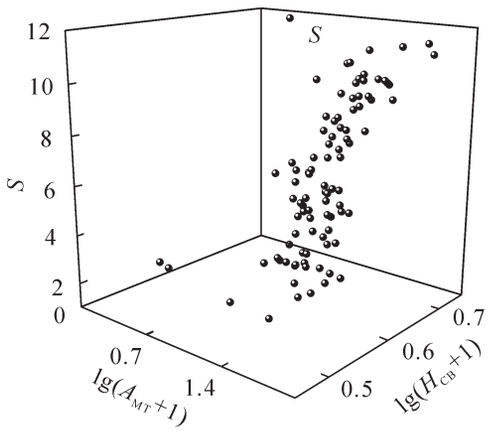


图 2　不同林下舒适度等级下冠层结构指标的变化

Figure 2　Change of canopy structures with S grades

以林下舒适度作为因变量，平均叶倾角、冠层厚度、冠下高为自变量，进行逐步回归分析(图 3)。排除的变量为冠层厚度，关系式各参数均达到显著水平($P<0.05$)，平均叶倾角和冠下高的协同作用对林下舒适度的解释程度为 51.1%，相较单一结构指标有所提升[10]。



S=3.158×lg(A_{MT}+1)+36.213×lg(H_{CB}+1)−19. 601, R^2=0. 511

图 3 林下舒适度随平均叶倾角和冠下高的变化

Figure 3 Change of S with A_{MT} and H_{CB}

3.4 冠层结构指标对舒适变化强度的影响

不同舒适变化强度等级下冠高比、冠层通透度差异极显著($P<0.01$)(表 5)。等级 6 下的冠高比显著($P<0.05$)高于其他等级下的冠高比；等级 1 下的冠层通透度显著($P<0.05$)小于其他等级下的冠层通透度。

随着舒适变化强度等级上升，冠高比和冠层通透度有上升的趋势。冠高比、冠层通透度较低时，林内舒适度优于林外(图 4)。舒适变化强度等级 5 和等级 6 下的数据分布较少，说明林内舒适度普遍优于林外。不同等级下的冠高比数据分布较均匀，近似正态分布(图 4A)；不同舒适变化强度等级下的 lg(P_C+1)的标准差分别为 0.27，0.40，0.47，0.48，0.42 和 0.57，等级 3~6 下的冠层通透度值较离散(图 4B)，使得等级间的差异不明显，说明较低的冠层垂直通透度才有利于增大林内外舒适差异，林隙的存在很容易造成林内舒适度值升高，甚至高于林外。林内舒适优于林外的冠高比和冠层通透度取值分别为 0.720±0.003 和 6.510%±0.884%。

表 5 不同舒适变化强度等级下冠层结构指标差异性分析

Table 5 The difference significanceof canopy structures in different grades of d_S

指标	舒适变化强度等级						显著性	
	1	2	3	4	5	6	F	P
lg(R_{CT}+1)	0.228 ± 0.003 c	0.231 ± 0.002 c	0.236 ± 0.001 bc	0.235 ± 0.001 bc	0.243 ± 0.002 b	0.255 ± 0.002 a	6.417	<0.001
lg(P_C+1)	0.764 ± 0.031 b	1.065 ± 0.035 a	1.081 ± 0.038 a	0.931 ± 0.043 a	1.085 ± 0.056 a	1.172 ± 0.125 a	7.906	<0.001

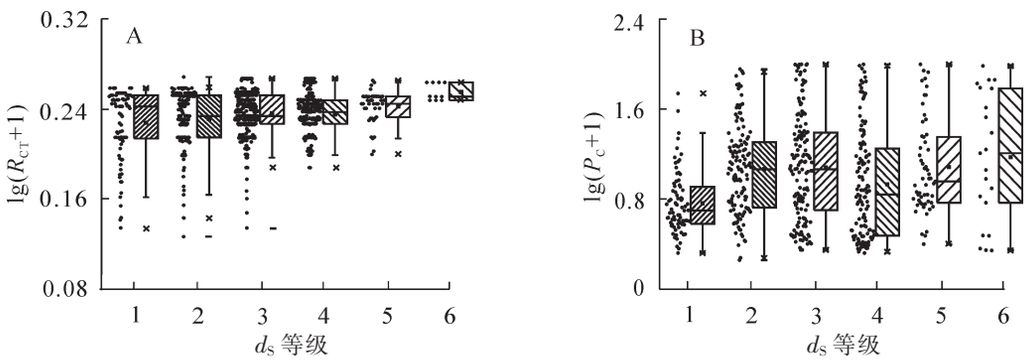


图 4 不同舒适变化强度等级下冠层结构指标的变化

Figure 4 Change of canopy structures with d_S grades

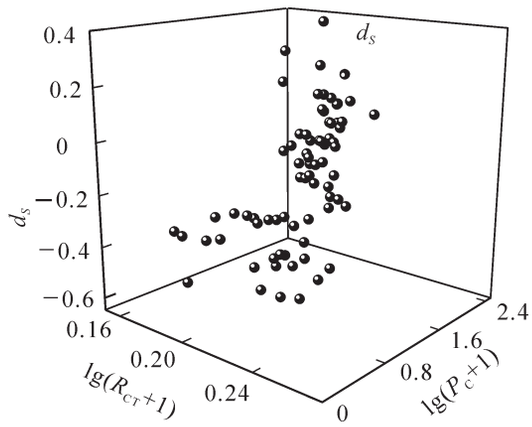
以舒适变化强度为因变量，冠高比和冠层通透度为自变量进行逐步回归分析(图 5)，关系式各参数均达到显著水平($P<0.05$)。冠高比和冠层通透度的协同作用对舒适变化强度的解释程度为 55.5%。

4 讨论

4.1 单一冠层结构指标对舒适度的影响

能提高城市森林舒适度的冠层结构指标主要有平均叶倾角、冠层厚度和冠下高。林下舒适度值随平均叶倾角的增加而升高，较低的平均叶倾角有利于提高林下热舒适。本研究平均叶倾角等于 0 的样方较多，这可能是由树种类型决定，也可能是高温天气对叶片生理状态的影响，不同林下舒适度等级下均有平均叶倾角等于 0 的样方分布。可见，平均叶倾角等于 0 时，对林下热舒适没有代表性，可能的原因是

阻隔热辐射的同时降低了冠层通风性；林下舒适度值随冠层厚度的增加而升高，较低的冠层厚度(7.4 m 左右)有利于增加林下舒适度。本研究关于冠层厚度与林内舒适度的关系是基于北京城市森林冠层厚度整体较高的基础上得出的结论，说明北京城市森林结构状况较好[15]，生态效益较强。如果要全面了解冠层厚度与林内舒适度的关系，则低冠层厚度(6.0 m 以下)对舒适度的影响还有待进一步研究。林下舒适度值随冠下高的增大而升高，较低的林下空间(2.7 m 左右)有利于提高林下舒适度，这可能是受高温高湿的特殊天气条件影响。符合以上条件的北京城市森林胸径分布为 16.2~19.2 cm，树高分布为 9.25~11.36 m。可见，夏季舒适度较高的北京城市森林主要分布在胸径等级居中，树高相对较低的林分中。



d_S=3.244×lg(R_{CT}+1)+0.468×lg(P_C+1)−1.348, R^2=0.555**

图 5　舒适变化强度随冠高比和冠层通透度的变化

Figure 5　Change of d_S with R_{CT} and P_C

增大林内外舒适变化强度的结构指标为冠高比和冠层通透度。舒适变化强度值随冠高比的增大而升高，较低冠高比有利于提高林下舒适度并增大林内外差异，与冠层厚度对舒适度的影响一致。可见，冠层厚度的改变对舒适度的影响力大于冠下空间的改变对舒适度的影响；舒适变化强度值随冠层通透度的增加而升高，较低的冠层通透度有利于促进林内舒适度优于林外。舒适变化强度等级 2 以上的冠层通透度数据离散性较大，说明冠层通透性较大时受环境条件的干扰较大，只有较低的通透度(6.51±0.884)%才能使林内舒适度显著优于林外。

4.2　冠层结构指标对舒适度的协同影响

本研究中单一结构指标对舒适度代表性总体较低，多个结构指标对舒适度的解释程度达到 50%以上，说明舒适度受多个指标共同影响，但仍有近 50%的舒适程度变化是由其他因子引起的。影响气候舒适度的原因是多样化的，水面及其面积大小[16]、不透水地面比例[17]、城市建筑[18]等，均对城市生态系统的人体舒适度有较大的影响。作为绿色基础设施，城市森林与建筑等灰色基础设施通常是融为一体的。本研究在各样点调查冠层结构时，尽量避开灰色基础设施，但仍难以排除周边灰色基础设施的影响。所以，欲准确阐释城市森林结构与林内气候舒适度的关系，需要将其他城市因子考虑在内。如何构建含灰色基础设施在内的城市森林生态系统冠层结构指数，这类指数是否能够更加准确地预测林内舒适度，还有待于进一步研究。

此外，本研究是在不考虑太阳辐射的前提下对舒适度进行的分析，实际上，光照、气压等也是影响人体舒适的重要因素[13,19]。因此评价北京城市森林舒适度的合理指数仍有待进一步研究。

5　参考文献

[1]　WANG Yupeng, BERARDIC U, AKBARI H. Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada [J]. *Energy Build*, 2016, **114**: 2 – 19.

[2]　刘鑫, 张金池, 谢德晋, 等. 南京近郊麻栎林冠层蒸腾时间变化及降温效应[J]. 浙江农林大学学报, 2015, **32**(4): 529 – 536.

LIU Xin, ZHANG Jinchi, XIE Dejin, *et al*. Temporal variation for canopy transpiration and its cooling properties in a *Quercus acutissima* forest of suburban Nanjing [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2015, **32**(4): 529 – 536.

[3]　贾宝全, 仇宽彪. 北京市平原百万亩大造林工程降温效应及其价值的遥感分析[J]. 生态学报, 2016, **37**(3): 726 – 735.

JIA Baoquan, QIU Kuanbiao. The cooling effect of plain afforestation in the Beijing Project and its remote sensing-based valuation [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **37**(3): 726 – 735.

[4]　WU Zhifeng, CHEN Liding. Optimizing the spatial arrangement of trees in residential neighborhoods for better cooling effects: integrating modeling with in-situ measurements [J]. *Landscape Urban Plann*, 2017, **167**: 463 – 472.

[5]　KLEMMA W, HEUSINKVELD B G, LENZHOLZER S, *et al*. Street greenery and its physical and psychological impact

on thermal comfort [J]. *Landscape Urban Plann*, 2015, **138**: 87 – 98.

[6] RAHMAN M A, ARMSON D, ENNOS A R. A comparison of the growth and cooling effectiveness of five commonly planted urban tree species [J]. *Urban Ecosyst*, 2015, **18**(2): 371 – 389.

[7] 苑征. 北京部分绿地群落温湿度状况及对人体舒适度影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
YUAN Zheng. *The Research on the Temperature and Humidity Condition and the Comfort Index in the Plant Communities of Beijing* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.

[8] 潘建彬, 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 Architec*, 2015, **31**(10) : 91 – 95.

[9] 刘海轩, 金桂香, 吴鞠, 等. 林分规模与结构对北京城市森林夏季温湿效应的影响[J]. 北京林业大学学报, 2015, **37**(10): 31 – 40.
LIU Haixuan, JIN Guixiang, WU Ju, *et al.* Effects of scale and structure of urban forest in lowering air temperature and increasing humidity in Beijing [J]. *J Beijing For Univ*, 2015, **37**(10): 31 – 40.

[10] 齐石茗月. 绿地对建筑外热环境特征及人体舒适度的影响[D]. 北京：北京林业大学, 2016.
QI Shimingyue. *The Influence of Green Space to External of Buildings' Thermal Environmental Characteristics and Human Comfort* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.

[11] 贾宝全, 马明娟. 辽宁抚顺近 10 年来市域热场与植被变化分析[J]. 遥感技术与应用, 2012, **27**(2): 256 – 264.
JIA Baoquan, MA Mingjuan. The variation analysis of surface heat status and vegetation index of Fushun city in recent 10 years [J]. *Remote Sens Technol Appl*, 2012, **27**(2): 256 – 264.

[12] 黄良美, 黄玉源, 黎桦, 等. 南宁市植物群落结构特征与局地小气候效应关系分析[J]. 广西植物, 2008, **28**(2): 211 – 217.
HUANG Liangmei, HUANG Yuyuan, LI Hua, *et al.* Analysis on the relation between the structural characteristics of plant communities and the microclimate effects in Nanning City, China [J]. *Guihaia*, 2008, **28**(2): 211 – 217.

[13] 郑有飞, 尹继福, 吴荣军, 等. 热气候指数在人体舒适度预报中的适用性[J]. 应用气象学报, 2010, **21**(6): 709 – 715.
ZHENG Youfei, YIN Jifu, WU Rongjun, *et al.* Applicability of universal thermal climate index to thermal comfort forecast [J]. *J Appl Meteorol Sci*, 2010, **21**(6): 709 – 715.

[14] 蔺银顶, 韩学武, 武小刚, 等. 城市绿地空间结构对绿地生态场的影响[J]. 生态学报, 2006, **26**(10): 3340 – 3346.
LIN Yinding, HAN Xuewu, WU Xiaogang, *et al.* Ecological field characteristic of green land based on urban green space structure [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, **26**(10): 3340 – 3346.

[15] 龚岚. 北京城区典型城市森林结构特点分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
GONG Lan. *Analysis of Characteristics of Typical Urban Forest Structure in Urbanized District of Beijing* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.

[16] 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: 以上海市为例[J]. 地理学报, 2013, **68**(11): 1461 – 1471.
PENG Baofa, SHI Yinshao, WANG Hefeng, *et al.* The impacting mechanism and laws of function of urban heat islands effect: a case study of Shanghai [J]. *Acta Geogr Sin*, 2013, **68**(11): 1461 – 1471.

[17] CONNORS J P, GALLETTI C S, CHOW W T L. Landscape configuration and urban heat island effects: assessing the relationship between landscape characteristics and land surface temperature in Phoenix, Arizona [J]. *Landscape Ecol*, 2013, **28**(2): 271 – 283.

[18] 应天玉, 李明泽, 范文义, 等. 基于 GIS 技术的城市森林与热岛效应的分析[J]. 东北林业大学学报, 2010, **38**(8): 63 – 67, 101.
YING Tianyu, LI Mingze, FAN Wenyi, *et al.* Analysis of urban forests and heat island effect based on GIS [J]. *J Northeast For Univ*, 2010, **38**(8): 63– 67, 101.

[19] 丁绍刚, 朱嫣然. 基于层次分析法与模糊综合评价法的医院户外环境综合评价体系构建[J]. 浙江农林大学学报, 2017, **34**(6): 1104 – 1112.
DING Shaogang, ZHU Yanran. Constructing a synthetic evaluation system of hospital out-door environment based on analytic hierarchy process and fuzzy synthetic evaluation [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2017, **34**(6): 1104 – 1112.