应 用 生 态 学 报 2015 年 6 月 第 26 卷 第 6 期
Chinese Journal of Applied Ecology, Jun. 2015, **26**(6): 1634-1640

夏季栾树群落冠层结构对其环境温湿度的调节作用*

秦 仲[1,2,3,4] 李湛东[1,2,3,4]** 成仿云[1,2,3,4] 沙海峰[5]

([1]北京林业大学园林学院, 北京 100083; [2]国家花卉工程技术研究中心, 北京 100083; [3]花卉种质创新与分子育种北京市重点实验室, 北京 100083; [4]城乡生态环境北京实验室, 北京 100083; [5]北京市林业种子苗木管理总站, 北京 100029)

摘 要 为探究栾树群落降温增湿作用与其冠层结构参数的相关性在一天中的变化趋势,于天气晴朗的夏季对北京奥林匹克森林公园栾树群落内部和对照点的温度、相对湿度、群落冠层结构参数进行了测定.结果表明: 栾树群落的郁闭度与叶面积指数、平均叶倾角呈显著相关,且叶面积指数与平均叶倾角呈显著相关;在夏季 8:00—18:00,栾树群落可降低空气温度 0.43~7.53 ℃,在 12:00 左右达到降温最大值,增加相对湿度 1%~22%,且在 10:00 左右增湿作用最显著,而在 18:00—次日 8:00 降温增湿效果不明显;9:00—12:00,郁闭度和叶面积指数显著影响栾树群落的降温增湿作用;12:00—14:00,仅郁闭度与降温增湿作用显著相关;直到 18:00,郁闭度和叶面积指数共同决定了栾树群落的降温增湿作用.因此,影响栾树群落降温增湿作用的冠层结构参数在一天中随着时间的推移发生变化.

关键词 园林植物; 空气温度; 相对湿度; 冠层结构参数; 栾树群落

文章编号 1001-9332(2015)06-1634-07 **中图分类号** S731.2; TU986.2 **文献标识码** A

Impact of canopy structural characteristics on inner air temperature and relative humidity of *Koelreuteria paniculata* community in summer. QIN Zhong[1,2,3,4], LI Zhan-dong[1,2,3,4], CHENG Fang-yun[1,2,3,4], SHA Hai-feng[5] ([1]*School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*; [2]*National Engineering Research Centre for Floriculture, Beijing* 100083, *China*; [3]*Beijing Key Laboratory of Ornamental Plants Germplasm Innovation and Molecular Breeding, Beijing* 100083, *China*; [4]*Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, Beijing* 100083, *China*; [5]*Beijing Forestry Seed and Seedling Management Station, Beijing* 100029, *China*). *-Chin. J. Appl. Ecol.*, 2015, **26**(6): 1634-1640.

Abstract: To investigate the diurnal variation of the correlations between the cooling and humidifying effects and canopy structural characteristics of the *Koelreuteria paniculata* community, the measurements of air temperature, relative humidity, canopy density, leaf area index (LAI) and mean leaf angle (MLA) were performed on calm sunny summer days in the community in Beijing Olympic Forest Park, China. There were significant correlations between the canopy density, LAI and MLA, which affected the cooling and humidifying effects together. The cooling effect reached its maximum by 12:00, whereas the humidifying effect reached its peak at 10:00. Compared with the control open space site, the community appeared to lower the air temperature by 0.43 to 7.53 ℃ and to increase the relative humidity by 1%-22% during the daytime. However, the cooling and humidifying effects seem to be not effective during the night. The canopy density and LAI were better for determining the cooling and humidifying effects from 9:00 to 12:00. However, these effects were largely controlled only by the canopy density from 12:00 to 14:00 and were significantly correlated with the canopy density and LAI afterwards until 18:00.

Key words: landscape plant; air temperature; relative humidity; canopy structural characteristics; *Koelreuteria paniculata* community.

* 北京市科学技术委员会项目(D141100004014004)资助.
** 通讯作者. E-mail: zhandong@bjfu.edu.cn
2014-08-15 收稿,2015-03-07 接受.

作为园林绿地中的重要组成单元，园林植物群落发挥着重要的生态服务功能，诸如降温增湿、滞尘、杀菌、减噪等[1-5]，尤其在炎热的夏季，园林植物群落可以通过自身生理活动对群落内部的热量、水分和 CO_2 的交换进行调节[6]，同时，也可利用自身的冠层结构，如郁闭度、叶面积指数、平均叶倾角等阻挡一定的太阳直接辐射和周围环境的反射辐射[7]，降低空气温度、增加相对湿度，进而调节局部环境的微气候，进一步缓解城市的“热岛效应”[8-10].

近年来，关于园林植物群落夏季降温增湿作用的研究日益增多，主要集中在不同的植物群落种类[11-13]、植物群落结构[14-18]、下垫面类型[19-20]以及绿地尺度[21]之间降温增湿作用的差异.研究表明，植物群落可以明显改善周围环境的温湿效应，其冠层结构通过直接或间接影响太阳辐射数量和植物本身的生理活动，在降温增湿过程中起重要作用[22-25].晏海等[17]通过对华北地区 8 个植物群落的测定，发现群落叶面积指数、冠层盖度越大，则群落内的空气温度越低，相对湿度越高.Peters 等[26]研究表明，植物群落的叶面积指数和郁闭度在很大程度上决定了地表的空气温度.同时，通过对上海市外环线以内地表温度与绿地覆盖率的相关性分析，表明绿地覆盖率与空气温度呈显著负相关，在整个外环线范围地区，绿地覆盖率每增加 1%，地表平均温度将下降 0.047 ℃[27].上述结论大多是基于每天的日平均降温增湿作用，而且模糊了树种的影响，忽略了影响植物群落降温增湿作用的冠层结构参数在一天中随着时间推移可能会发生变化.

栾树（*Koelreuteria paniculata*）为无患子科栾树属落叶乔木，是北京的乡土树种和使用频率较高的秋色叶树种.近年来，在国家倡导低碳园林、大量使用乡土树种的背景下，栾树由于具有极高的观赏价值，且耐寒、耐旱、耐盐碱，被林业部门列入北京市第一批主要绿化树种，其在北京城市园林建设中的应用量将逐渐增加[28].因此，本文以栾树群落为研究对象，探讨了栾树群落冠层结构参数之间的相关关系，分析了栾树群落降温增湿作用的日变化趋势，着重研究了在一天中的不同时段栾树群落降温增湿作用与郁闭度、叶面积指数、平均叶倾角的相关性，以期为今后栾树群落的园林应用提供科学依据.

1　研究地区与研究方法

1.1　研究区概况

北京市（39°40′—41°60′ N，115°70′—117°40′ E）位于华北平原西北边缘，地处中纬地带，属于典型的暖温带半湿润大陆性季风气候，1 月均温最低，7 月均温最高，全年无霜期 180～200 d，年降雨量 630 mm，超过 70%降雨集中在 7、8 月[29].本研究在北京奥林匹克森林公园（40°—40° 2′ N，116° 22′—116°24′ E）进行，总面积达 680 hm^2，其中绿地面积约 450 hm^2，植被覆盖率达 90%（植物群落区域占地面积在 70%以上）[29].公园模拟北京当地乡土生态环境及植物自然群落的组合规律，可以达到进一步改善城市生态环境的作用.

1.2　栾树群落概况

栾树群落位于奥林匹克森林公园南园的西部（40°1′ N，116°22′ E），面积为 50 m×50 m，人可以自由进入，且远离大面积水域和大型服务性建筑，包括 84 株尺寸规格和树龄相近的栾树，种植密度为 0.03 株·m^{-2}（表 1）.选择与栾树群落下垫面基本一致、距该群落不超过 100 m 的空旷草地作为对照点，其地被植物生长状态正常，将冠层结构作为研究对象与对照点之间的主要变量.

1.3　测定项目与方法

园林植物群落降温增湿作用最明显的时期是天气晴朗的夏季，故本试验在 2012 年 8 月 10—15 日进行，阴天、大风和下雨等非典型夏季气候暂停试验.按照每 2 个测点间隔 10 m 且均匀布点的方式，在群落内设置 16 个测点.测定群落内每株栾树的指标（胸径、冠幅、树高）、空气温度、相对湿度、冠层结构特征（郁闭度、叶面积指数、平均叶倾角）.

在16个测点和对照点处，分别放置CENTER-

表 1　栾树群落空间结构特征

Table 1　Structural characteristics of *Koelreuteria paniculata* community

物种 Species	高度 Height (m)	胸径 Diameter at breast height (cm)	郁闭度/盖度 Canopy density/ ground cover (%)	叶面积指数 Leaf area index	平均叶倾角 Mean leaf angle (°)
栾树 *K. paniculata*	9.34±2.67	13.52±1.84	0.90±0.07	2.14±0.23	68.96±20.40
野牛草 *Buchloe dactyloides*	0.19±0.04	–	0.83±0.06	–	–
狗尾草 *Setaria viridis*	0.37±0.07	–	0.09±0.04	–	–
抱茎苦荬菜 *Ixeridium sonchifolium*	0.13±0.05	–	0.06±0.03	–	–

342 温湿度记录仪(温度测试精度±0.4 ℃,相对湿度测试精度±3%)同步记录栾树群落的温湿度,每天 24 h 连续测定,记录时间间隔 1 min,测定高度为 1.5 m.

基于现场测绘的群落植物分布图,详细测量、记录每株栾树的相关参数,即胸径、冠幅、树高.用 CI-110 植物冠层图像分析仪分别测定叶面积指数和平均叶倾角,并使用配套的 CI-110 软件计算数值[30].利用数码相机(SONY DSC-T20)在距离地面 1.5 m 高处使镜头始终保持水平向群落冠层拍照,借助 Adobe Photoshop CS5 软件,将照片转为灰度双色调图像,统计整个冠层封闭区域和天空影像的像素[31].郁闭度 = 1-冠层范围内天空影像的像素值/整个冠层范围像素值.

1.4 数据处理

将降温作用和增湿作用分别定义为温度差值和湿度差值,计算公式:

$$dT_{air} = T_{airsun} - T_{airsh}$$

$$dRH = RH_{sh} - RH_{sun}$$

式中:dT_{air} 为温度差值(℃);T_{airsun} 为对照点温度;T_{airsh} 为群落内部温度;dRH 为湿度差值(%);RH_{sh} 为群落内部湿度;RH_{sun} 为对照点湿度.

将试验中每天同一时刻的温湿度值进行算术平均,再将同一时刻 16 个测点的数据进行平均计算,得到该时刻群落的温湿度数据,并在 Excel 2010 软件中绘制温湿度的日变化趋势图.利用 SPSS 17.0 软件对群落内部和对照点白天(8:00—18:00)及晚上(18:00—次日 8:00)的温湿度分别进行单因素方差分析.分别将降温增湿值与 3 个冠层结构参数导入 SPSS 17.0 软件进行相关性分析,评价郁闭度、叶面积指数、平均叶倾角对降温增湿作用的影响程度,并将其分析结果在 Excel 2010 软件中记录并作图.最后,依据群落内 16 个测点的郁闭度、叶面积指数和平均叶倾角数据,在 ArcView GIS 3.3 中通过空间插值计算,分别绘制3个冠层结构参数在群落中的水平分布图.

表 2 栾树群落郁闭度、叶面积指数和平均叶倾角之间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between the canopy density, LAI and MLA of the *Koelreuteria paniculata* community

	郁闭度 Canopy density	叶面积指数 LAI	平均叶倾角 MLA
郁闭度 Canopy density		0.332**	0.667**
叶面积指数 LAI	0.332**		0.365**
平均叶倾角 MLA	0.667**	0.365**	

*$P<0.05$; ** $P<0.01$. 下同 The same below.

2 结果与分析

2.1 栾树群落郁闭度与叶面积指数、平均叶倾角的相关关系

一般情况下,郁闭度大的测点具有较大的叶面积指数和平均叶倾角.而叶面积指数较大的区域平均叶倾角也较大(图 1).栾树群落的郁闭度与叶面积指数和平均叶倾角均呈显著正相关,但郁闭度和叶面积指数的相关性不及平均叶倾角.此外,叶面积指数与平均叶倾角也达到显著相关(表 2).因此,栾树群落的 3 个冠层结构参数之间表现出密切的相关关系,且共同影响群落的降温增湿作用.

2.2 栾树群落降温和增湿作用的日变化

2.2.1 降温作用的日变化 栾树群落内部及对照点的温度均随时间呈现“上升—下降—上升”的变化趋势,在 15:00 左右达到全天的最高温度.除了 19:00—次日 6:00,栾树群落内各个测点的温度均低于对照点,对照点的温度为 21.93~37.78 ℃,而群落内部的温度集中在 22.92~30.48 ℃(图 2).同时,栾树群落的降温作用在一天中表现出单峰型变化,且与对照点的温度有关.8:00—12:00,随着外界温度的升高,栾树群落的降温作用越来越显著,并在中午 12:00 左右达到最大值;19:00之后,随着太阳辐射的消失以及地面辐射和大气逆辐射的增加,外界温度降低而群落内部温度升高,导致降温值<0,表明栾树群落在该时段失去了降温作用,直到次日

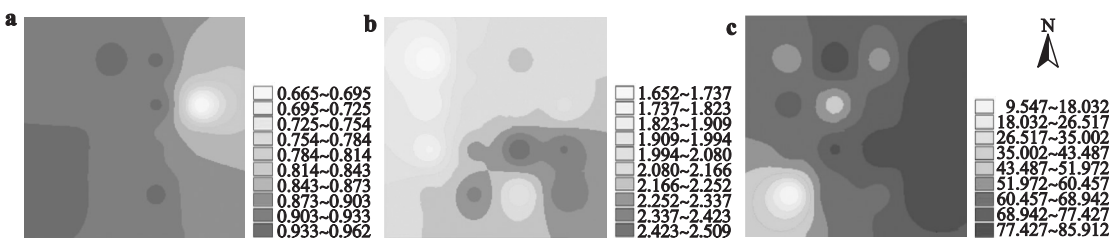


图 1 栾树群落郁闭度(a)、叶面积指数(b)和平均叶倾角(c)的分布

Fig.1 Distribution of the canopy density (a), LAI (b) and MLA (c).

7:00 以后,降温值>0,依次完成周期性的变化.

栾树群落白天平均温度(8:00—18:00)与对照点差异显著,这表明在 8:00—18:00,栾树群落具有明显的降温作用,与对照点相比,栾树群落的降温作用为 0.43~7.53 ℃,平均值为 3.75 ℃.栾树群落晚上平均温度(18:00—次日 8:00)与对照点无显著差异,这与降温作用日变化情况一致.

2.2.2 增湿作用的日变化　栾树群落内部及对照点的相对湿度在一天中均呈现"U"型变化,随着温度的升高相对湿度逐渐降低,且在 15:00 左右群落温度达到最大值时,相对湿度最小(图 2).除了 19:00—次日 6:00 以外,群落内部的相对湿度均高于对照点,主要为 57%~92%,而对照点相对湿度最低为 46%,最高为 97%,表明栾树群落在一天的大部分时间中均可发挥增湿作用,并在 10:00 左右达到最大值;但是 19:00 以后,对照点相对湿度高于群落内部,即增湿作用出现负值,这是因为晚上外界温度急剧降低,湿度相应升高,同时,植物群落的蒸腾作用减弱,散发出的水分减少,因此群落内部湿度逐渐降低,直到低于对照点;次日 7:00,增湿作用缓慢恢复,在 8:00 左右呈现正值,重新发挥增湿作用.

将栾树群落和对照点的白天平均相对湿度(8:00—18:00)、晚上平均相对湿度(18:00—次日 8:00)进行单因素方差分析,白天群落的平均相对湿度与对照点有显著差异,所以在白天,栾树群落的增湿作用非常有效,相比对照点,平均增湿 11%,最小值为 1%,最大值为 22%;但在晚上,群落内部相对湿度与对照点不存在显著差异,表明该时段栾树群落虽然可以增加林下空间的相对湿度,但这种增湿作用很有限,与其日变化趋势一致.

2.3 栾树群落降温和增湿作用与郁闭度、叶面积指数、平均叶倾角的相关性

2.3.1 降温作用　由于栾树群落降温作用显著的时间段为 8:00—18:00,故在该时间段内探讨降温作用与郁闭度、叶面积指数和平均叶倾角的相关性.栾树群落的 3 个冠层结构参数均可对其降温作用产生影响,但对每个参数的影响程度不一样,且这种影响随时间的推移而发生变化(图 3).相对于平均叶倾角,郁闭度、叶面积指数均与降温作用关系紧密,郁闭度的作用显著且稳定,而叶面积指数的影响却波动较大.在 8:00—12:00,郁闭度、叶面积指数与降温作用呈显著正相关,而平均叶倾角对降温作用的影响不显著.12:00—14:00,叶面积指数的作用出现波动,仅郁闭度显著影响群落的降温作用,直至18:00,郁闭度和叶面积指数又与降温作用呈显著正相关(表 3).

2.3.2 增湿作用　由于栾树群落增湿作用明显的时间段为 8:00—18:00,因而在该时间段内将增湿作用分别与郁闭度、叶面积指数、平均叶倾角进行相关

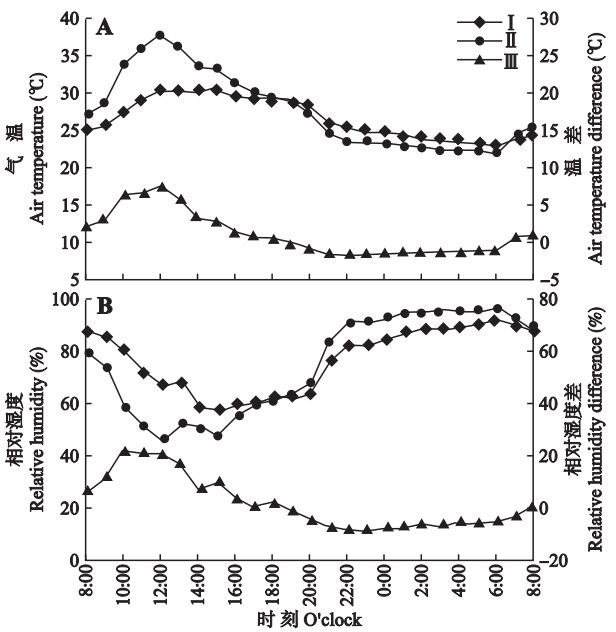


图 2　栾树群落空气温度(A)和相对湿度(B)的日变化

Fig.2　Diurnal variation in the air temperature and relative humidity of the *Koelreuteria paniculata* community.

Ⅰ: 栾树群落 *K. paniculata* comunity; Ⅱ: 对照点 Control open space site; Ⅲ: 差值 Difference.

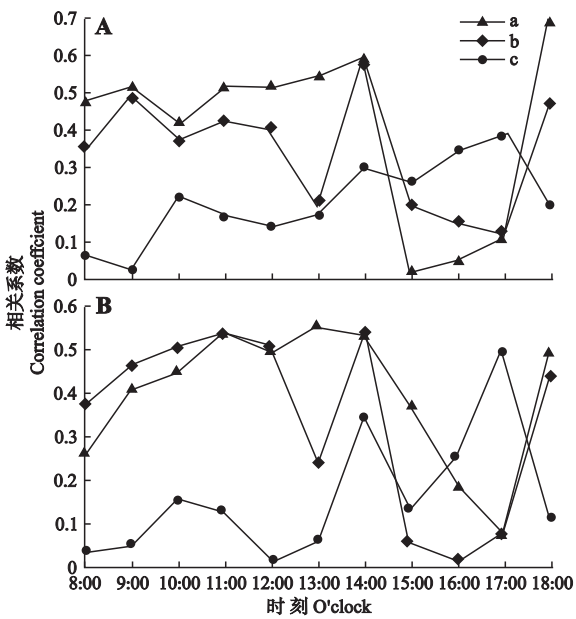


图 3　栾树群落降温(A)和增湿(B)作用与郁闭度(a)、叶面积指数(b)、平均叶倾角(c)相关系数的日变化

Fig.3　Diurnal variation in the correlation coefficients between the cooling and humidifying effect and canopy density (a), LAI (b) and MLA (c).

表 3 栾树群落降温和增湿作用与郁闭度、叶面积指数、平均叶倾角的相关性

Table 3 Correlation between the cooling and humidifying effect and canopy density, LAI and MLA

	时刻 O'clock	郁闭度 Canopy density	叶面积指数 LAI	平均叶倾角 MLA
降温作用	8:00—12:00	0.515**	0.445*	0.096
Cooling	12:00—14:00	0.682*	0.360	0.287
effect	18:00	0.699**	0.466*	0.198
增湿作用	9:00—12:00	0.524*	0.529*	0.101
Humidifying	12:00—14:00	0.617*	0.354	0.184
effect	18:00	0.497*	0.443*	0.116

性分析.在试验过程中,郁闭度、叶面积指数和平均叶倾角均在不同程度上决定了群落的增湿作用,但这种作用并非恒定.从整体上看,郁闭度、叶面积指数对增湿作用的影响大于平均叶倾角,且在 14:00 之后表现出了不稳定(图 3).9:00—12:00,郁闭度、叶面积指数与增湿作用呈显著正相关,而平均叶倾角的促进作用不明显;12:00—14:00,叶面积指数的作用骤然减弱,仅郁闭度显著影响群落的增湿作用;17:00 以后,郁闭度、叶面积指数与增湿作用之间的相关性逐渐增强,在 18:00 左右,郁闭度和叶面积指数又共同决定了栾树群落的增湿作用,而平均叶倾角的影响依然很弱(表 3).

3 讨 论

3.1 栾树群落降温增湿作用的日变化

目前,大多数研究的关注焦点集中在日平均温湿作用与冠层结构参数的相关性[16-17],忽略了影响降温增湿作用的冠层结构参数有可能在一天中的不同时段发生变化.因此,本文在描述栾树群落降温增湿作用日变化趋势的基础上,系统分析了一天中不同时段降温增湿作用与冠层结构参数的相关性.

由于植物群落主要依靠其冠层结构阻挡太阳直接辐射,对内部温湿度进行调节,所以在一天当中随着太阳直接辐射的规律性变化,植物群落的降温增湿作用也表现出一定规律[12].随着环境温度的升高,蒸腾作用相应增强,而冠层结构限制了蒸腾作用释放水分的散失,使得群落内部湿度维持在较高的水平[7,32].本研究中,栾树群落的降温增湿作用也呈现出周期性的日变化趋势,降温作用在12:00左右达到最大值,增湿作用在 10:00 左右达到最大值,白天可降温 0.43~7.53 ℃,平均 3.75 ℃,可增湿 1%~22%,平均 11%.这与植物群落在城市园林绿地环境下可降温 0.80~5.15 ℃、增湿 3%~9%[17,33-35] 的结论一致.

在 19:00—次日 6:00 降温增湿作用出现负值,这是因为晚上对照点的温度骤降,而群落内部白天积累的热量由于冠层结构的遮挡不易散发出去,使得群落内部的温度在该时段反而比对照点高.同时,晚上植物的生理活动减弱,水分大量储藏在植物叶片中而不会散发到群落内部,因此晚上群落内的湿度比对照点小.而白天植物的各种生理活动又会消耗大量水分,直至晚上又开始建立这样的水分存储,所以群落的温湿作用形成一个周期性的日变化趋势[15].晏海等[17]对华北地区树木群落(包括栾树群落)夏季微气候特征的研究也得出类似的结论.

3.2 栾树群落冠层结构参数对降温增湿作用的影响

武小刚等[16]对绿地绿量、叶面积指数与绿地降温增湿效应之间的相关性进行了研究,认为在垂直方向上降温效应与叶面积指数呈显著正相关,但增湿效应与叶面积指数的相关性不显著.同时,毛白杨群落的叶面积指数和郁闭度对其环境温湿度具有重要的调节作用,且这种调节作用在一天中的不同时段分别发生变化[24].本研究也发现,郁闭度和叶面积指数是影响栾树群落降温增湿作用的主要因子,进一步验证了 Emily 等[26]的研究成果,即在白天,地表空气温度的高低主要由郁闭度和叶面积指数决定,郁闭度越大、叶面积指数越高,则群落内的空气温度就越低.

但是,这 2 个影响因子与降温增湿作用的相关性在一天中并非固定不变,而是随着时间的推移发生变化.9:00—12:00,郁闭度和叶面积指数与降温增湿作用均呈显著相关,而 12:00—14:00,只有郁闭度显著影响群落的降温增湿作用,直至 18:00,郁闭度和叶面积指数又共同决定了降温增湿作用.群落冠层对太阳辐射的阻挡影响着群落内部的温湿度[6-7],又因为太阳入射角在一天中的不同时刻发生变化,所以群落冠层的阻挡效果也相应改变,当入射角度较小且辐射强度较弱时,群落冠层所承受的阻挡强度相对较小,因此郁闭度可以对群落内部的温湿度起到决定作用,而随着入射角度逐渐增大,辐射强度增强,不仅郁闭度,叶面积指数也会对调节群落内部的温湿度发挥重要作用.但是,与空气温度相比,相对湿度受群落冠层结构的影响较小.这是因为相对湿度不仅受植物蒸腾作用影响,还受到土壤含水量、灌溉时间、土壤蒸发以及地被植物盖度等因素的影响.

本文重点探讨了栾树群落的降温增湿作用及其与 3 个冠层结构参数的相关性，其他常用园林树种以及其他影响降温增湿作用的冠层结构参数还有待进一步研究.以此为基础，可以基于降温增湿作用，对植物配置中园林树种的选择提供科学依据，确保城市绿地在一天中的不同时段均可呈现出明显的温湿效应.同时，根据植物群落冠层结构参数与降温增湿作用之间的相关性，通过对冠层结构参数的测定，也可初步评价植物群落的温湿效应.

参考文献

[1] Chen Z-X (陈自新), Su X-H (苏雪痕), Liu S-Z (刘少宗), *et al*. Study on ecological benefits of Beijing urban gardening. *Chinese Landscape Architecture* (中国园林), 1998, **14**(1): 57 (in Chinese)

[2] Akbari H, Pomerantz M, Taha H. Cool surface and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 2001, **70**: 259-310

[3] Lin Y-D (蔺银鼎). Studies on the ecological effect of urban greens. *Chinese Landscape Architecture* (中国园林), 2003, **19**(11): 36-38 (in Chinese)

[4] Fang CF, Ling DL. Guidance for noise reduction provided by tree belts. *Landscape and Urban Planning*, 2005, **71**: 29-34

[5] Li F (李　锋), Wang R-S (王如松). Research advance in ecosystem service of urban green space. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(3): 527-531 (in Chinese)

[6] Foley JA, Costa MH, Delire C, *et al*. Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect Earth's climate. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003, **1**: 38-44

[7] Tanaka K, Hashimoto S. Plant canopy effects on soil thermal and hydrological properties and soil respiration. *Ecological Modelling*, 2006, **196**: 32-44

[8] Chen Z-X (陈自新), Su X-H (苏雪痕), Liu S-Z (刘少宗), *et al*. Study on ecological benefits of Beijing urban gardening. *Chinese Landscape Architecture* (中国园林), 1998, **14**(3): 53-56 (in Chinese)

[9] Brown RD, Gillespie TJ. Microclimatic landscape design: Creating thermal comfort and energy efficiency. *Microclimatic Landscape Design*, 2008, **1**: 1-4

[10] Gomez-Munoz VM, Porta-Gandara MA, Fernandez JL. Effect of tree shades in urban planning in hot-arid climatic regions. *Landscape and Urban Planning*, 2010, **94**: 149-157

[11] Souch CA, Souch C. The effect of trees on summertime below canopy urban climates: A case study Bloomington, Indiana. *Journal of Arboriculture*, 1993, **19**: 303-312

[12] Hamada S, Ohta T. Seasonal variations in the cooling effect of urban green areas on surrounding urban areas. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2010, **9**: 15-24

[13] Ma X-Z (马秀枝), Li C-S (李长生), Chen G-W (陈高娃), *et al*. The effects of reducing temperature and increasing humidity of greenery trees in Inner Mongolia Agricultural University. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University* (内蒙古农业大学学报), 2011, **32**(1): 125-130 (in Chinese)

[14] Hardin PJ, Jensen RR. The effect of urban leaf area on summertime urban surface kinetic temperatures: A Terre Haute case study. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2007, **6**: 63-72

[15] Byrne LB, Bruns MA, Kim KC. Ecosystem properties of urban land covers at the aboveground-belowground interface. *Ecosystems*, 2008, **11**: 1065-1077

[16] Wu X-G (武小钢), Lin Y-D (蔺银鼎), Yan H-B (闫海冰), *et al*. Correlation between ecological effect and structure characteristics of urban green areas. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2008, **16**(6): 1469-1473 (in Chinese)

[17] Yan H (晏　海), Wang X (王　雪), Dong L (董丽). Microclimatic characteristics and human comfort conditions of tree communities in northern China during summer. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2012, **34**(5): 57-63 (in Chinese)

[18] Zhu C-Y (朱春阳), Li S-H (李树华), Ji P (纪鹏). Relationships between urban greenbelt structure and temperature-humidity effect. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(5): 1255-1260 (in Chinese)

[19] Akbari H, Taha H. The impact of trees and white surfaces on residential heating and cooling energy use in four Canadian cities. *Energy*, 1992, **17**: 141-149

[20] Huang LM, Li JL, Zhao DH, *et al*. A fieldwork study on the diurnal changes of urban microclimate in four types of ground cover and urban heat island of Nanjing, China. *Building and Environment*, 2008, **43**: 7-17

[21] Zhu C-Y (朱春阳), Li S-H (李树华), Ji P (纪鹏), *et al*. Effects of the different width of urban green belts on the temperature and humidity. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(2): 383-394 (in Chinese)

[22] Arora VK, Boer GJ. A parameterization of leaf phenology for the terrestrial ecosystem component of climate models. *Global Change Biology*, 2005, **11**: 39-59

[23] Jenerette GD, Harlan SL, Brazel A, *et al*. Regional relationships between surface temperature, vegetation, and human settlement in a rapidly urbanizing ecosystem. *Landscape Ecology*, 2007, **22**: 353-365

[24] Qin Z, Li ZD, Cheng FY, *et al*. Influence of canopy structural characteristics on cooling and humidifying effects of *Populus tomentosa* community on calm sunny summer days. *Landscape and Urban Planning*, 2014, **128**: 75-82

[25] Li Y-H (李英汉), Wang J-J (王俊坚), Chen X (陈雪), *et al*. Effects of green space vegetation canopy pattern on the microclimate in residential quarters of Shenzhen City. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(2): 343-349 (in Chinese)

[26] Peters EB, McFadden JP. Influence of seasonality and

vegetation type on suburban microclimates. *Urban Ecosystems*, 2010, **13**: 443-460

[27] Li J-X (李俊祥), Song Y-C (宋永昌), Fu H-N (傅徽楠). Correlation between land surface temperature and rate of greenspace coverage in central area of Shanghai. *Shanghai Environmental Sciences* (上海环境科学), 2003, **22**(9): 599-601 (in Chinese)

[28] Zhang B-X (张宝鑫), Zhang Z-M (张治明), Li Y-M (李延明). Study on the selection and application of landscape tree species. *Chinese Landscape Architecture* (中国园林), 2009, **25**(4): 94-98 (in Chinese)

[29] Pan J-B (潘剑彬). Ecological Effects of Beijing Olympic Forestry Park. PhD Thesis. Beijing: Beijing Forestry University, 2011 (in Chinese)

[30] Norman JM, Campbell GS. Canopy structure// Pearcy RW, Ehleringer J, Mooney HA, eds. Plant Physiological Ecology: Field Methods and Instrumentation. New York: Chapman and Hall, 1989

[31] Luo H (骆 汉), Qi Y-X (祁有祥), Zhao T-N (赵廷宁), *et al*. The CCPS applied in the study on relation between canopy density and stand volume. *Soil and Water Conservation in China* (中国水土保持), 2011(1): 51-54 (in Chinese)

[32] Smith DL, Johnson L. Vegetation-mediated changes in microclimate reduce soil respiration as woodlands expand into grasslands. *Ecology*, 2004, **85**: 3348-3361

[33] Jonsson P. Vegetation as an urban climate control in the subtropical city of Gaborone, Botswana. *International Journal of Climatology*, 2004, **24**: 1307-1322

[34] Zoulia I, Santamouris M, Dimoudi A. Monitoring the effect of urban green areas on the heat island in Athens. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, **156**: 275-292

[35] Vailshery LS, Jaganmohan M, Nagendra H. Effect of street trees on microclimate and air pollution in a tropical city. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2013, **12**: 408-415

作者简介 秦 仲,男,1986 年生,博士研究生.主要从事园林植物应用与园林生态研究. E-mail: zqxj15@163.com

责任编辑 孙 菊