

引用格式: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 J X, Song T, Zhang B, et al. The relationship between urban green space community structure and air temperature reduction and humidity increase in Beijing[J]. *Resources Science*, 2016, 38(6):1028-1038]. DOI: 10.18402/resci.2016.06.03

北京城市绿地群落结构对降温增湿功能的影响

高吉喜¹, 宋婷², 张彪³, 韩永伟², 高馨婷², 冯朝阳²

(1. 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042;

2. 中国环境科学研究院国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100012;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:清晰揭示城市绿地的空间布局与景观结构特征对其生态服务功能的影响对指导城市规划设计具有重要参考价值。目前国内外已有较多城市绿地降温增湿及其影响因素的实证研究,但是定量解析绿地群落结构与降温增湿功能关系的研究并不多见。本文基于北京市24个典型绿地群落夏季降温增湿效果的实测,重点解析了绿地郁闭度和绿量对降温增湿功能的影响,并提出了绿地结构优化配置的最优阈值。研究结果表明:北京城市绿地夏季日均降温幅度0.2~2.0℃,日均增湿幅度0.20%~8.26%;不同群落结构绿地降温效果上,乔灌草型>乔草或乔木型>灌草型>草地型;在绿地增湿效果上,乔木型>乔灌草>乔草型>灌草型>草地型;郁闭度和绿量对绿地降温增湿功能均有明显影响,但郁闭度影响更大,冠层郁闭度介于0.60~0.85、三维绿量密度 $\geq 5\text{m}^3/\text{m}^2$ 的乔灌草或乔草型绿地具有最大降温增湿功能。

关键词:城市绿地;群落结构;降温增湿;郁闭度;三维绿量;北京市

DOI: 10.18402/resci.2016.06.03

1 引言

城市绿地是指城市中以自然植被和人工植被为主要存在形态的城市用地^[1]。作为城市公共设施的重要组成部分,城市绿地不仅为居民提供美学景观和休闲游憩场所,而且在人居环境质量改善和区域生态安全维护上有着不可或缺作用。目前,国内外已有大量城市绿地生态功能实证研究,清晰揭示了城市绿地减缓热岛效应、净化空气、削减噪声、调蓄雨水以及房产增值和防灾避险等方面的重要作用^[2-9]。

近年来,全球气候变化和快速城市化引发的城市热岛问题引起高度关注,热岛效应加剧不仅降低城市环境舒适度,而且增加夏季空调电能消耗和臭氧排放以及高温死亡危险^[10-12]。如何利用城市绿地的降温增湿效应减缓城市热岛的适应机制研究受

到重视^[13-15],比如李辉等测定城市居住区不同结构绿地的降温增湿作用发现,乔灌草型绿地优于灌草型和草坪型绿地^[16]。吴菲等发现,绿地的绿量越大,降温增湿效果越好^[17]。马秀梅等利用HOBO便携式气象站对比测定城市林荫道、草坪和广场对城市小气候的影响,发现林荫道有较好的降温保湿效果^[18]。刘娇妹等认为,只有在绿地覆盖率 $\geq 60\%$ 时,绿地才具有明显的降温增湿效果,且乔灌草复合型绿地的降温增湿效应好于草坪^[19]。总体来看,结构复杂、郁闭度高、叶面积指数大、植株高的群落要比结构简单、郁闭度低、叶面积指数小、植株矮的群落降温增湿作用明显^[20]。

目前已有较多相关城市绿地降温增湿及其影响因素的实证研究,初步证实了绿地降温增湿效应及其限制因子。但是,在城市建设与绿地规划设计

收稿日期:2015-04-20;修订日期:2016-05-09

基金项目:国家环境保护公益性行业科研专项(201209027;201409055);国家自然科学基金资助项目(31200531)。

作者简介:高吉喜,男,内蒙古呼和浩特人,博士,研究员,主要从事区域生态学与生态红线研究。E-mail: gix@nies.org

通讯作者:张彪, E-mail: zhangbiao@igsnrr.ac.cn

2016年6月

中,需要对绿地结构配置模式与其最优生态服务功能之间的关系有清晰认知,而目前定量解析绿地群落结构与降温增湿功能的研究并不多见,城市绿地结构优化配置决策缺少有效信息支持。

本研究基于24个典型绿地群落的降温增湿功能实测,量化分析了不同群落结构绿地的降温增湿效果,并采用SPSS多重比较分析法,重点解析绿地郁闭度和绿量对降温增湿功能的影响,提出能够充分发挥绿地降温增湿功能的群落结构优化配置模式,为城市绿地建设与优化管理提供参考依据。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

北京地处华北平原西北部,属典型的暖温带半湿润大陆性季风气候,夏季高温多雨,日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 的高温天气比较常见。近年来北京城市热岛范围有所扩大,热岛强度呈增强趋势,且夏季出现强热岛的天数激增,对高温灾害起到明显的增幅作用^[10,21]。不过,绿色植被通过蒸腾过程能降低周围环境温度,减缓热岛效应。北京城市绿地主要由公园绿地、附属绿地、防护绿地、道路(河岸)绿地和生产绿地组成,绿地组成结构较复杂,以乔灌草型为主,其次为乔木型和乔灌型绿地^[2]。

2.2 样地调查

基于北京城市园林绿地空间分布^[22],选取8个代表性绿地24个样地(群落结构)观测其降温增湿功能(表1)。在每个样地内,选择不同配置模式而下垫面情况相似的观测样方,包括草地、灌草、乔木、乔草或乔灌草5种结构配置类型,并选择一块开阔的无植被区域作为对照。乔木样方设置为20m \times 20m,灌木和草地样方为10m \times 10m。在复合型绿地中,20m \times 20m大样方内按照东、南、西、北、中5个位置设置2m \times 2m的草地群落调查小样方;在10m \times 10m小样方内,以对角线形式设置3个2m \times 2m的草地群落调查小样方。

样方调查首先记录群落的各层种类组成,逐株测量乔木层所有乔木的基径、分盖度、胸径、树高、枝下高和树冠幅等特征,灌木层逐株测量灌木冠径、多度、高度和分盖度等,草地样方内记录所有草本植物的分盖度、多度和高度等特征。

样地郁闭度或覆盖度(乔木层为郁闭度,灌草

层为覆盖度)取样地两对角线上树冠或蓬径覆盖的总长度与两对角线的总长之比;三维绿量是指所有生长植物茎叶所占据的空间体积,而三维绿量密度是指单位面积群落样方上的三维绿量值,采用周延刚文献资料中三维绿量计算方程估算各样方绿量密度^[23,24]。

2.3 实验观测与评估方法

在2010年7月和8月选择晴朗无风或微风天气,同步观测绿地样方和对照样地的温度和相对湿度。试验仪器为4台FR210气象站,架设高度为1.5m。仪器温度精度为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$,分辨率为 0.1°C ,测量范围为 $-40\sim 55^{\circ}\text{C}$;相对湿度精度为 $\pm 2\%$,分辨率为 0.1% ,测量范围为 $0\sim 100\%$ 。每个样地连续观测3天,每天观测时间为7:00~19:00,每分钟记录一个数据,每小时计算该时段内温度和相对湿度平均值。记录数据使用Microsoft Excel进行二次曲线拟合分析,完成相关性检验,并采用SPSS12.0软件进行方差分析,完成显著性检验。

绿地群落降温增湿效果分别采用日均降温百分率(T_p)和日均增湿百分率表示(H_p),计算公式为:

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{T_{ci} - T_i}{T_{ci}} \times 100\%}{n} \quad (1)$$

$$H_p = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{H_i - H_{ci}}{H_i} \times 100\%}{n} \quad (2)$$

式中 T_{ci} 为对照样方第*i*时刻的温度值($^{\circ}\text{C}$); T_i 为群落样方第*i*时刻的温度值($^{\circ}\text{C}$); 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($n=13$)。

为便于绿地降温增湿效果与群落结构的多重比较分析,分别将被测试绿地样方的郁闭度和三维绿量密度分级(表2),然后采用SPSS软件的多重比较分析模块,分别进行群落郁闭度和三维绿量密度对降温增湿功能的显著性分析。当 $P>0.05$ 时表示差异性不显著, $0.01<P<0.05$ 时表示差异性显著, $P<0.01$ 时表示差异性极显著。

3 结果及分析

3.1 不同群落结构的降温增湿功能比较

绿色植物能够吸收、反射并遮挡太阳辐射,借助自身的光合作用将太阳能转化为化学能,使到达

表1 北京城市绿地观测样地基本情况

Table 1 Information of plant community structures in sample plots

样地名称	绿地类型	群落结构	优势物种	郁闭度	绿量密度 (m^3/m^2)
东风公园	公园绿地	草地型	土麦冬(<i>Liriope spicata</i> (Thunb.) Lour.); 草甸羊茅(<i>Festuca pratensis</i> Huds.)	0	0.39
		乔草型	构树(<i>Broussonetia papyrifera</i> (Linn.) L'Hér. ex Vent.); 土麦冬(<i>Liriope spicata</i> (Thunb.)) Lour.); 草甸羊茅(<i>Festuca pratensis</i> Huds.)	0.78	4.33
		乔灌木	毛白杨(<i>Populus tomentosa</i> Carr.); 金银木(<i>Lonicera maackii</i> Rupr. Maxim.); 草甸羊茅(<i>Festuca pratensis</i> Huds.)	0.67	9.20
杜仲公园	公园绿地	乔草型	杜仲(<i>Eucommia ulmoides</i> Oliver); 鸢尾(<i>Iris tectorum</i> Maxim.)	0.80	3.92
		乔灌木	杜仲(<i>Eucommia ulmoides</i> Oliver); 牡丹(<i>Paeonia suffruticosa</i> Andr.); 芍药(<i>Paeonia lactiflora</i> Pall.); 鸢尾(<i>Festuca pratensis</i> Huds.)	0.76	3.27
		灌木型	丁香(<i>Syzygium aromaticum</i> (L.) Merr. Et Perry); 田 璇 花(<i>Convolvulus arvensis</i> L.); 朝天委陵菜(<i>Potentilla supina</i> L.)	0.10	0.50
金田公园	公园绿地	草地型	沙地柏(<i>Sabina vulgaris</i> Ant.); 狗尾草(<i>Setaria viridis</i> (Linn.) Beauv.); 灰菜(<i>Chenopodium album</i> Linn.)	0	0.56
		灌木型	丁香(<i>Syzygium aromaticum</i> (L.) Merr. Et Perry); 狗尾草(<i>Setaria viridis</i> (Linn.) Beauv.)	0.38	2.35
		乔草型	枣树(<i>Ziziphus jujuba</i> Mill.); 灰菜(<i>Setaria viridis</i> (Linn.) Beauv.); 打碗花(<i>Calystegia hederacea</i> Wall.)	0.79	5.10
			白 扞(<i>Picea meyeri</i> Rehd. et Wils.); 圆柏(<i>Sabina chinensis</i> (Linn.) Ant.); 白车轴草(<i>Trifolium repens</i> Linn.); 紫花地丁(<i>Viola philippica</i> Cav.); 狗尾草(<i>Setaria viridis</i> (Linn.) Beauv.)	0.30	0.71
		乔草型			
		乔草型	银杏(<i>Ginkgo biloba</i> Linn.); 狗尾草(<i>Setaria viridis</i> (Linn.) Beauv.)	0.35	2.20
		乔灌木	新疆杨(<i>Populus alba</i> Linn. var. <i>pyramidalis</i> Bunge); 红瑞木(<i>Swida alba</i> Opiz); 草地早熟禾(<i>Poa pratensis</i> Linn.)	0.74	8.20
北五环片林	防护绿地	乔草型	毛白杨(<i>Populus tomentosa</i> Carr.); 葎草(<i>Humulus scandens</i> (Lour.) Merr.); 灰菜(<i>Chenopodium album</i> Linn.)	0.62	9.08
七棵树片林	防护绿地	乔灌木	洋槐(<i>Robinia pseudoacacia</i> L.); 旱柳(<i>Salix matsudana</i> Koidz.); 臭椿(<i>Ailanthus altissima</i> (Mill.) Swingle); 金银木(<i>Lonicera maackii</i> Rupr. Maxim.); 草甸羊茅(<i>Festuca pratensis</i> Huds.)	0.52	4.02
		乔木型	油松(<i>Pinus tabulaeformis</i> Carr.); 旱柳(<i>Pinus tabulaeformis</i> Carr.)	0.42	3.02
		乔木型	油松(<i>Pinus tabulaeformis</i> Carr.); 龙爪槐(<i>Sophora japonica</i> Linn. var. <i>japonica f. pendula</i> Hort.)	0.40	0.62
西坝河片林	防护绿地	乔木型	洋槐(<i>Robinia pseudoacacia</i> L.)	0.68	2.29
		乔木型	毛白杨(<i>Populus tomentosa</i> Carr.)	0.55	2.80
小井村片林	防护绿地	乔木型	白腊(<i>Fraxinus chinensis</i> Roxb.); 旱柳(<i>Salix matsudana</i> Koidz.)	0.92	13.49
		乔木型	旱柳(<i>Salix matsudana</i> Koidz.)	0.63	5.16
		乔木型	毛白杨(<i>Populus tomentosa</i> Carr.)	0.65	8.00
中国环科院内	附属绿地	草地型	土麦冬(<i>Populus tomentosa</i> Carr.); 草甸羊茅(<i>Populus tomentosa</i> Carr.)	0	0.41
		乔草型	梨树(<i>pirus</i> , i, f.); 草地早熟禾(<i>Poa pratensis</i> Linn.)	0.65	1.50
		乔草型	梨树(<i>pirus</i> , i, f.); 草地早熟禾(<i>Poa pratensis</i> Linn.)	0.70	3.20

地面及树冠下面的太阳辐射显著减少,以此达到降温效果。测试结果表明(见图1),北京城市绿地群落夏季日均降温幅度0.20~2.00℃,平均降温1.00℃。其中,乔灌木型绿地降温效果最好,日均降

温1.28℃;其次为乔草型绿地和乔木型绿地,日均降温幅度均为1.12℃;灌木型绿地和草地型降温效果较差,日均降温幅度分别为0.46℃和0.42℃。结合大量绿地降温效果实测结果,北京地区园林绿地夏

2016年6月

表2 北京城市绿地方群落郁闭度、三维绿量密度分级

of sample plots			
级别	郁闭度	级别	绿量密度/(m ³ /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<2
III	0.4≤郁闭度<0.5	III	2≤密度<3
IV	0.5≤郁闭度<0.6	IV	3≤密度<5
V	0.6≤郁闭度<0.7	V	5≤密度<6
VI	0.7≤郁闭度<0.8	VI	6≤密度<9
VII	郁闭度≥0.8	VII	密度≥9

注:以草地为参照,其郁闭度和绿量密度均设为0。

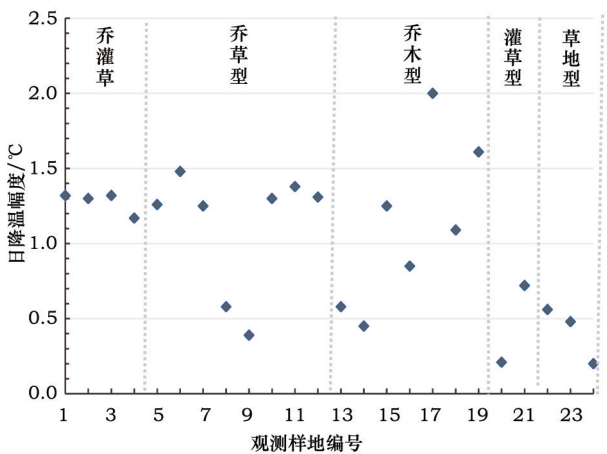


图1 北京城市绿地群落夏季日均降温幅度

Figure 1 Decrease degree of summer temperature in urban green space of Beijing

季降温效果理论值在0.80~4.80℃之间^[2],降温幅度稍高于本次观测值,原因在于该研究观测时间段内取平均值所致^[2]。一般来说,绿地降温增湿效应在气温较高时最为显著,相对于其他观测实验,本次实验观测期间的初始期与结束期环境气温较低,导致平均降温幅度较小^[25]。此外,不同群落类型绿地方样的降温效果均呈现出乔灌木>乔草或乔木型>灌草型>草地型绿地,这一结果符合前人的研究结论^[16,19,20]。

绿色植物叶片通过蒸腾过程带走空气中热量的同时,增加了空气中的相对湿度,这对于改善北方地区干燥气候环境的舒适度有积极作用。观测结果表明,北京城市绿地夏季日均增湿能力在0.20%~8.26%之间,平均增湿能力达3.77%。分不

同群落结构来看,按照样地平均增湿能力(增湿率的算术平均值),乔木型绿地增湿效果最好,日均增湿4.66%;其次为乔灌木型绿地和乔草型绿地,日均增湿能力分别为3.92%和3.68%;灌草型和草地型绿地的增湿效果较差,日均增湿能力分别为3.11%和2.13%(图2)。

3.2 郁闭度对降温增湿功能的影响

3.2.1 郁闭度对降温能力的影响

以观测样地降温率为横坐标、群落郁闭度为纵坐标作散点图,并用二次曲线进行拟合,分析冠层郁闭度对绿地降温效果的影响(图3)。结果表明,

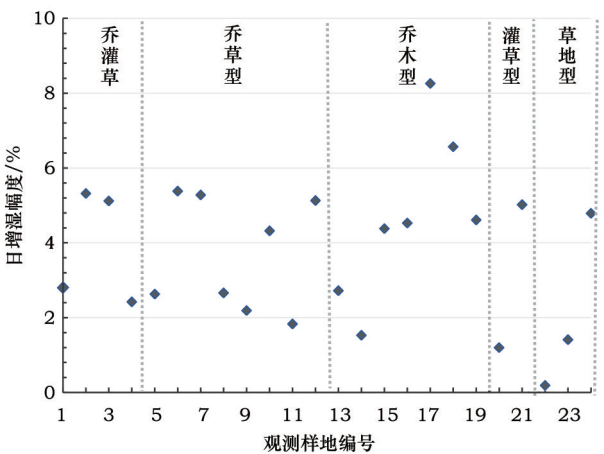


图2 北京城市绿地夏季日均增湿能力

Figure 2 Increase degree of summer humidity in urban green space of Beijing

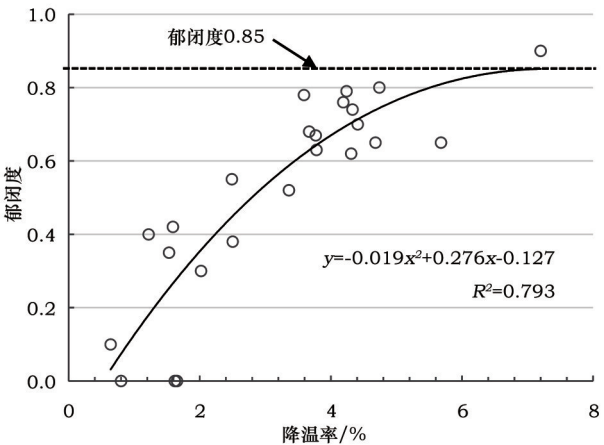


图3 北京城市绿地观测样地降温率与郁闭度关系

Figure 3 Relation between temperature reduction ratio and canopy density in sample plots

绿地群落的降温能力随郁闭度的增大而升高,降温率与郁闭度的相关系数为0.793,说明群落郁闭度对降温率有影响,但是这种影响逐渐趋于平缓。当郁闭度接近0.85时,曲线出现明显拐点,夏季绿地降温能力达到最大值。当郁闭度大于0.85时,绿地的降温作用不再有明显提高。

采用样地降温率与相应郁闭度所处级别进行方差分析(表3),检验差异显著性的统计量 F 为18.007,大于该组数据在0.001上的标准值 $F(0.001, 6, 17)6.56$,系统自动检验的显著性概率为0.000,小于0.001的置信水平。方差分析表明,群落郁闭度对绿地降温率有显著影响。

以草地为对照(郁闭度为0),将降温率与郁闭度进行多重比较分析(表4)。结果发现,郁闭度 ≥ 0.5 的绿地群落(Ⅳ-Ⅶ级)其降温效果与草地有显著差异($P < 0.5$),而郁闭度 < 0.50 的绿地群落(Ⅰ-Ⅲ级)与草地差异不明显。该结果说明只有当复层结构绿地郁闭度达到0.50时,绿地群落才具有明显的降温效果。

综合以上分析结果,为有效发挥绿地降温效果的最佳配置模式,需要群落郁闭度下限值为0.50,上限值为0.85。

表3 按城市绿地郁闭度分级的降温率方差分析

Table 3 Variance analysis of temperature reduction ratio from different canopy density

	平方和	df	均方	F	显著性
组间	62.132	6	10.355	18.007	0.000
组内	9.776	17	0.575		
总数	71.908	23			

3.2.2 郁闭度对增湿能力的影响

以观测样地增湿率为横坐标,郁闭度为纵坐标作散点图,并用二次曲线进行拟合,分析群落郁闭度对增湿能力的影响(图4)。结果表明,样地降温率与群落郁闭度的相关系数为0.685,说明郁闭度对增湿率有一定影响,但不如对降温率的影响明显。这意味着,绿地增湿能力的增加需要考虑群落内的立体配置模式。当群落郁闭度接近0.80时,曲线出现明显拐点,绿地增湿能力达到最高值。随着郁闭度的继续增加,绿地的增湿作用也不明显提高。

表4 不同等级郁闭度的北京城市绿地降温率多重比较

Table 4 Multiple comparisons for the temperature reduction ratio and canopy density

郁闭度 级别		均差	显著性	95%的置信区间	
			水平 P 值	下限	上限
I	II	0.329 17	0.577	-0.892 8	1.551 2
	III	-0.048 33	0.945	-1.508 9	1.412 2
	IV	-1.568 33*	0.037	-3.028 9	-0.107 8
	V	-2.941 67*	0.000	-4.073 0	-1.810 3
	VI	-2.795 33*	0.000	-3.963 8	-1.626 9
	VII	-4.563 33*	0.000	-6.023 9	-3.102 8
II	I	-0.329 17	0.577	-1.551 2	0.892 8
	III	-0.377 50	0.573	-1.763 1	1.008 1
	IV	-1.897 50*	0.010	-3.283 1	-0.511 9
	V	-3.270 83*	0.000	-4.303 6	-2.238 1
	VI	-3.124 50*	0.000	-4.197 8	-2.051 2
	VII	-4.892 50*	0.000	-6.278 1	-3.506 9
III	I	0.048 33	0.945	-1.412 2	1.508 9
	II	0.377 50	0.573	-1.008 1	1.763 1
	IV	-1.520 00	0.061	-3.120 0	0.080 0
	V	-2.893 33*	0.000	-4.199 7	-1.587 0
	VI	-2.747 00*	0.000	-4.085 6	-1.408 4
	VII	-4.515 00*	0.000	-6.115 0	-2.915 0
IV	I	1.568 33*	0.037	0.107 8	3.028 9
	II	1.897 50*	0.010	0.511 9	3.283 1
	III	1.520 00	0.061	-0.080 0	3.120 0
	V	-1.373 33*	0.040	-2.679 7	-0.067 0
	VI	-1.227 00	0.070	-2.565 6	0.111 6
	VII	-2.995 00*	0.001	-4.595 0	-1.395 0
V	I	2.941 67*	0.000	1.810 3	4.073 0
	II	3.270 83*	0.000	2.238 1	4.303 6
	III	2.893 33*	0.000	1.587 0	4.199 7
	IV	1.373 33*	0.040	0.067 0	2.679 7
	VI	0.146 33	0.754	-0.822 5	1.115 2
	VII	-1.621 67*	0.018	-2.928 0	-0.315 3
VI	I	2.795 33*	0.000	1.626 9	3.963 8
	II	3.124 50*	0.000	2.051 2	4.197 8
	III	2.747 00*	0.000	1.408 4	4.085 6
	IV	1.227 00	0.070	-0.111 6	2.565 6
	V	-0.146 33	0.754	-1.115 2	0.822 5
	VII	-1.768 00*	0.013	-3.106 6	-0.429 4
VII	I	4.563 33*	0.000	3.102 8	6.023 9
	II	4.892 50*	0.000	3.506 9	6.278 1
	III	4.515 00*	0.000	2.915 0	6.115 0
	IV	2.995 00*	0.001	1.395 0	4.595 0
	V	1.621 67*	0.018	0.315 3	2.928 0
	VI	1.768 00*	0.013	0.429 4	3.106 6

注:*表示显著性水平 P 值小于0.05的均差。

2016年6月

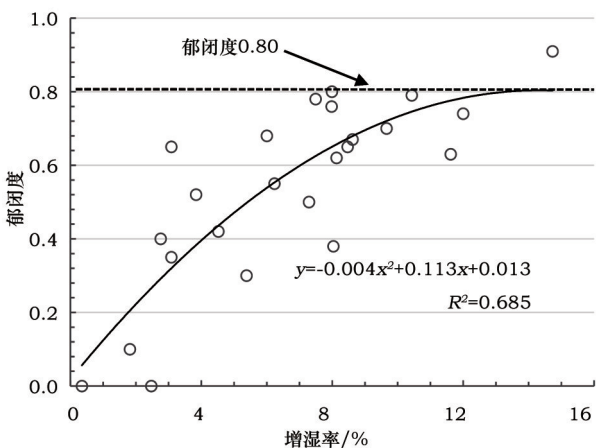


图4 北京城市绿地观测样地增湿率与郁闭度关系

Figure 4 Relation between humidity increase ratio and canopy density in sample plots

采用群落郁闭度与样地增湿率进行方差分析(表5),显著性概率为0.017,小于0.05;检验差异显著性的统计量 F 为3.591,大于该组数据在0.05置信水平下的标准值 $F(0.05, 6, 17) 2.70$ 。结果说明,郁闭度对绿地增湿率有一定影响,但这种影响低于郁闭度对降温率的影响。

以草地样方作为对照,由增湿率与郁闭度进行多重比较分析(表6),结果发现,只有当郁闭度 ≥ 0.60 的绿地群落(V-VII级),其增湿效果才与草地有显著差异($P < 0.05$),而郁闭度 < 0.60 的绿地(I-IV级),其增湿效果与草地的差异不显著。

综合以上结果,发挥绿地最佳增湿效果的配置方式,要求群落郁闭度下限值为0.60,上限值为0.80。

3.3 绿量对降温增湿功能的影响

3.3.1 绿量对降温能力影响

以测试样地降温率为横坐标,三维绿量为纵坐标作散点图,并用二次曲线进行拟合,分析群落绿量对夏季降温效果的影响(图5)。结果表明,绿地

表5 北京城市绿地按郁闭度分级的增湿率方差分析

Table 5 Variance analysis of humidity increase ratio from different

canopy density					
	平方和	df	均方	F	显著性
组间	163.945	6	27.324	3.591	0.017
组内	129.363	17	7.610		
总数	293.308	23			

表6 不同等级郁闭度的北京城市绿地的增湿率多重比较

Table 6 Multiple comparisons for the humidity increase ratio and

canopy density					
郁闭度级别		均差	显著性水平 P 值	95%的置信区间	
				下限	上限
I	II	-1.209 62	0.573	-5.654 7	3.235 5
	III	-0.272 92	0.915	-5.585 9	5.040 0
	IV	-1.664 40	0.518	-6.977 3	3.648 5
	V	-4.285 09*	0.042	-8.400 5	-0.169 7
	VI	-6.143 93*	0.007	-10.394 3	-1.893 6
	VII	-7.991 06*	0.006	-13.304 0	-2.678 1
II	I	1.209 62	0.573	-3.235 5	5.654 7
	III	0.936 70	0.700	-4.103 6	5.977 0
	IV	-0.454 78	0.851	-5.495 1	4.585 5
	V	-3.075 47	0.102	-6.832 3	0.681 3
	VI	-4.934 31*	0.016	-8.838 5	-1.030 1
	VII	-6.781 43*	0.011	-11.821 7	-1.741 1
III	I	0.272 92	0.915	-5.040 0	5.585 9
	II	-0.936 70	0.700	-5.977 0	4.103 6
	IV	-1.391 48	0.620	-7.211 5	4.428 6
	V	-4.012 17	0.093	-8.764 2	0.739 9
	VI	-5.871 01*	0.021	-10.740 4	-1.001 6
	VII	-7.718 13*	0.012	-13.538 2	-1.898 1
IV	I	1.664 40	0.518	-3.648 5	6.977 3
	II	0.454 78	0.851	-4.585 5	5.495 1
	III	1.391 48	0.620	-4.428 6	7.211 5
	V	-2.620 69	0.261	-7.372 7	2.131 3
	VI	-4.479 53	0.069	-9.348 9	0.389 9
	VII	-6.326 66*	0.035	-12.146 7	-0.506 6
V	I	4.285 09*	0.042	0.169 7	8.400 5
	II	3.075 47	0.102	-0.681 3	6.832 3
	III	4.012 17	0.093	-0.739 9	8.764 2
	IV	2.620 69	0.261	-2.131 3	7.372 7
	VI	-1.858 83	0.281	-5.383 0	1.665 4
	VII	-3.705 96	0.118	-8.458 0	1.046 1
VI	I	6.143 93*	0.007	1.893 6	10.394 3
	II	4.934 31*	0.016	1.030 1	8.838 5
	III	5.871 01*	0.021	1.001 6	10.740 4
	IV	4.479 53	0.069	-0.389 9	9.348 9
	V	1.858 83	0.281	-1.665 4	5.383 0
	VII	-1.847 13	0.435	-6.716 5	3.022 3
VII	I	7.991 06*	0.006	2.678 1	13.304 0
	II	6.781 43*	0.011	1.741 1	11.821 7
	III	7.718 13*	0.012	1.898 1	13.538 2
	IV	6.326 66*	0.035	0.506 6	12.146 7
	V	3.705 96	0.118	-1.046 1	8.458 0
	VI	1.847 13	0.435	-3.022 3	6.716 5

注:*表示显著性水平 P 值小于0.05的均差。

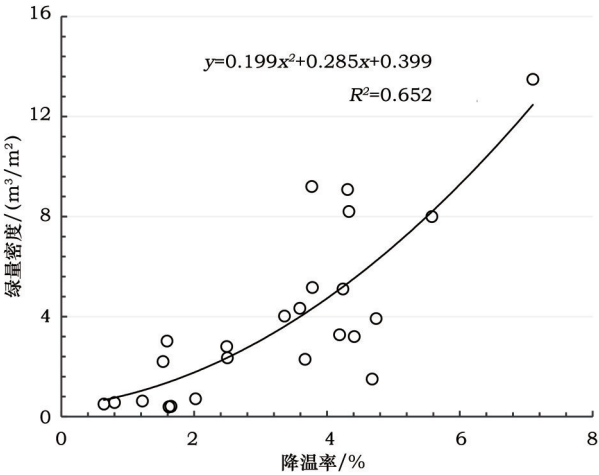


图5 北京城市绿地观测样地降温率与三维绿量关系

Figure 5 Relation between temperature reduction ratio and green biomass in sample plots

降温率与绿量密度的相关系数为0.652,说明绿量对降温率有一定影响,但是低于郁闭度对降温效果的影响。三维绿量密度由样方内所有层次的植被共同决定,可以通过选择绿量大的物种或丰富绿地群落结构增加绿量值。因此,在提高绿地郁闭度受到限制的情况下,可通过提高绿量的方式改善绿地降温作用。

采用降温率与不同级别群落绿量进行方差分析(表7),各类样方之间的差异显著性概率为0.013,小于0.05的显著性水平;检验差异显著性的统计量 F 为3.833,大于该组数据在0.05置信水平下的标准统计量 $F(0.05, 6, 17)$ 为2.700,说明绿地群落三维绿量密度对降温率有显著影响。

以草地为对照,由样地降温率与三维绿量密度进行多重比较分析(表8),结果发现,当三维绿量密度 $\geq 3\text{m}^3/\text{m}^2$ 时(Ⅳ-Ⅶ级),其降温率与草地有显著差异($P<0.05$),而与三维绿量密度 $< 3\text{m}^3/\text{m}^2$ 的绿地群落(Ⅰ-Ⅲ级)降温效果与草地差异不明显。该结果说明绿地群落的三维绿量密度至少达到 $3\text{m}^3/\text{m}^2$ 时,

表7 按绿量密度分级的降温率方差分析

Table 7 Variance analysis of temperature reduction ratio from different green biomass

	平方和	df	均方	F	显著性
组间	35.296	6	5.883	3.833	0.013
组内	26.093	17	1.535		
总数	61.389	23			

表8 不同等级三维绿量密度的降温率多重比较

Table 8 Multiple comparisons for the temperature reduction ratio and green biomass

绿量密度 级别		均差	显著性 水平 P 值	95%的置信区间	
				下限	上限
Ⅰ	Ⅱ	-0.855 33	0.358	-2.764 2	1.053 6
	Ⅲ	-1.206 67	0.249	-3.340 9	0.927 5
	Ⅳ	-2.290 00*	0.018	-4.138 3	-0.441 7
	Ⅴ	-2.653 33*	0.031	-5.039 4	-0.267 2
	Ⅵ	-3.598 33*	0.005	-5.984 4	-1.212 2
	Ⅶ	-3.703 33*	0.002	-5.837 5	-1.569 1
Ⅱ	Ⅰ	0.855 33	0.358	-1.053 6	2.764 2
	Ⅲ	-0.351 33	0.703	-2.260 2	1.557 6
	Ⅳ	-1.434 67	0.073	-3.017 4	0.148 1
	Ⅴ	-1.798 00	0.101	-3.984 9	0.388 9
	Ⅵ	-2.743 00*	0.017	-4.929 9	-0.556 1
	Ⅶ	-2.848 00*	0.006	-4.756 9	-0.939 1
Ⅲ	Ⅰ	1.206 67	0.249	-0.927 5	3.340 9
	Ⅱ	0.351 33	0.703	-1.557 6	2.260 2
	Ⅳ	-1.083 33	0.233	-2.931 6	0.764 9
	Ⅴ	-1.446 67	0.218	-3.832 8	0.939 4
	Ⅵ	-2.391 67*	0.050	-4.777 8	-0.005 6
	Ⅶ	-2.496 67*	0.024	-4.630 9	-0.362 5
Ⅳ	Ⅰ	2.290 00*	0.018	0.441 7	4.138 3
	Ⅱ	1.434 67	0.073	-0.148 1	3.017 4
	Ⅲ	1.083 33	0.233	-0.764 9	2.931 6
	Ⅴ	-0.363 33	0.724	-2.497 5	1.770 9
	Ⅵ	-1.308 33	0.213	-3.442 5	0.825 9
	Ⅶ	-1.413 33	0.125	-3.261 6	0.434 9
Ⅴ	Ⅰ	2.653 33*	0.031	0.267 2	5.039 4
	Ⅱ	1.798 00	0.101	-0.388 9	3.984 9
	Ⅲ	1.446 67	0.218	-0.939 4	3.832 8
	Ⅳ	0.363 33	0.724	-1.770 9	2.497 5
	Ⅵ	-0.945 00	0.456	-3.558 9	1.668 9
	Ⅶ	-1.050 00	0.366	-3.436 1	1.336 1
Ⅵ	Ⅰ	3.598 33*	0.005	1.212 2	5.984 4
	Ⅱ	2.743 00*	0.017	0.556 1	4.929 9
	Ⅲ	2.391 67*	0.050	0.005 6	4.777 8
	Ⅳ	1.308 33	0.213	-0.825 9	3.442 5
	Ⅴ	0.945 00	0.456	-1.668 9	3.558 9
	Ⅶ	-0.105 00	0.927	-2.491 1	2.281 1
Ⅶ	Ⅰ	3.703 33*	0.002	1.569 1	5.837 5
	Ⅱ	2.848 00*	0.006	0.939 1	4.756 9
	Ⅲ	2.496 67*	0.024	0.362 5	4.630 9
	Ⅳ	1.413 33	0.125	-0.434 9	3.261 6
	Ⅴ	1.050 00	0.366	-1.336 1	3.436 1
	Ⅵ	0.105 00	0.927	-2.281 1	2.491 1

注: *表示显著性水平 P 值小于0.05的均差。

2016年6月

才能够起到明显的降温作用。

3.3.2 绿量对增湿能力影响

同样,以观测样地增湿率为横坐标,群落绿量密度为纵坐标作散点图,并用二次曲线进行拟合,分析绿量对绿地增湿作用的影响(图6)。结果表明,绿地增湿率与绿量密度的相关系数为0.637,说明绿量密度对增湿率的影响接近(降温率与绿量密度相关系数为0.652)。如果要提高绿地群落的增湿能力,增大群落顶层郁闭度和群落内物种的立体配置模式同样重要。

然后,对群落三维绿量密度与增湿率的关系进行方差分析(表9),显著性概率为0.008,小于0.05;检验差异显著性的统计量 F 为4.347,大于该组数据在0.05置信水平下的标准值 $F(0.05, 6, 17)$ 2.70。结果说明,三维绿量密度对绿地增湿能力有显著影响,且高于对降温能力的影响。

以草地样方作为对照,由观测样地增湿率与群落绿量密度进行多重比较分析(表10),结果发现,只有当绿量密度 $\geq 5\text{m}^3/\text{m}^2$ 的绿地群落(V-VII级),其

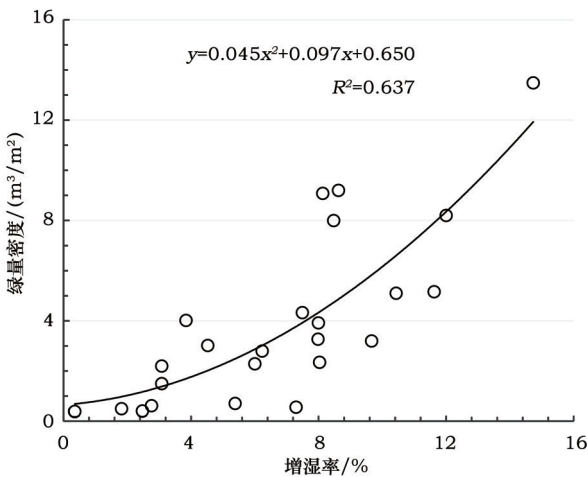


图6 北京城市绿地观测样地增湿率与绿量密度关系

Figure 6 Relation between humidity increase ratio and green biomass in sample plots

表9 基于三维绿量密度分级的增湿率方差分析

Table 9 Variance analysis of humidity increase ratio from different canopy density

	平方和	df	均方	F	显著性
组间	177.562	6	29.594	4.347	0.008
组内	115.746	17	6.809		
总数	293.308	23			

表10 北京城市绿地不同等级三维绿量密度的增湿率多重比较

Table 10 Multiple comparisons for the humidity increase ratio and green biomass

绿量密度级别		均差	显著性 水平 P 值	95%的置信区间	
				下限	上限
I	II	-0.845 92	0.663	-4.866 4	3.174 5
	III	-1.735 19	0.427	-6.230 2	2.759 8
	IV	-3.546 43	0.072	-7.439 2	0.346 3
	V	-7.658 10*	0.005	-12.683 6	-2.632 6
	VI	-6.864 89*	0.010	-11.890 4	-1.839 3
	VII	-7.121 90*	0.004	-11.616 9	-2.626 9
II	I	0.845 92	0.663	-3.174 5	4.866 4
	III	-0.889 28	0.647	-4.909 7	3.131 2
	IV	-2.700 51	0.106	-6.034 1	0.633 1
	V	-6.812 19*	0.006	-11.418 2	-2.206 2
	VI	-6.018 97*	0.013	-10.625 0	-1.413 0
	VII	-6.275 98*	0.004	-10.296 4	-2.255 5
III	I	1.735 19	0.427	-2.759 8	6.230 2
	II	0.889 28	0.647	-3.131 2	4.909 7
	IV	-1.811 23	0.340	-5.704 0	2.081 5
	V	-5.922 91*	0.024	-10.948 5	-0.897 4
	VI	-5.129 70*	0.046	-10.155 2	-0.104 2
	VII	-5.386 70*	0.022	-9.881 7	-0.891 7
IV	I	3.546 43	0.072	-0.346 3	7.439 2
	II	2.700 51	0.106	-0.633 1	6.034 1
	III	1.811 23	0.340	-2.081 5	5.704 0
	V	-4.111 68	0.070	-8.606 7	0.383 3
	VI	-3.318 46	0.138	-7.813 4	1.176 5
	VII	-3.575 47	0.069	-7.468 2	0.317 3
V	I	7.658 10*	0.005	2.632 6	12.683 6
	II	6.812 19*	0.006	2.206 2	11.418 2
	III	5.922 91*	0.024	0.897 4	10.948 5
	IV	4.111 68	0.070	-0.383 3	8.606 7
	VI	0.793 21	0.765	-4.712 0	6.298 4
	VII	0.536 21	0.825	-4.489 3	5.561 8
VI	I	6.864 89*	0.010	1.839 3	11.890 4
	II	6.018 97*	0.013	1.413 0	10.625 0
	III	5.129 70*	0.046	0.104 2	10.155 2
	IV	3.318 46	0.138	-1.176 5	7.813 4
	V	-0.793 21	0.765	-6.298 4	4.712 0
	VII	-0.257 01	0.915	-5.282 5	4.768 5
VII	I	7.121 90*	0.004	2.626 9	11.616 9
	II	6.275 98*	0.004	2.255 5	10.296 4
	III	5.386 70*	0.022	0.891 7	9.881 7
	IV	3.575 47	0.069	-0.317 3	7.468 2
	V	-0.536 21	0.825	-5.561 8	4.489 3
	VI	0.257 01	0.915	-4.768 5	5.282 5

注:*表示显著性水平 P 值小于0.05的均差。

增湿效率才与草地有显著差异($P<0.05$);而绿量密度 $<5\text{m}^3/\text{m}^2$ 的绿地(I-IV级),增湿效果虽然与草地也存在差异,但并不显著。因此,只有保证复层结构绿地的三维绿量密度达到 $5\text{m}^3/\text{m}^2$ 以上时,才能有效发挥绿地群落的增湿作用。

4 结论与讨论

4.1 结论

在当前城市用地日益紧张的情况下,通过优化绿地植物配置,增加城市绿量,提高绿地生态效益具有重要实际意义。本研究基于24个典型绿地样地,实测了其夏季降温增湿功能及其差异,重点分析了群落郁闭度(灌木为覆盖度)与三维绿量对降温增湿能力的影响,从而分析具有最大生态服务功能的群落配置模式。结果发现,在群落水平上的绿地规划设计,应以乔灌木和乔草型等复层结构绿地为优先模式,保证绿地郁闭度 ≥ 0.60 ,同时不要超过0.85,过大的郁闭度对降温增湿功能起不到太大的促进作用,反而会抑制林下植被的生长,增加绿地建设成本。同时,需要综合考虑群落绿量密度的要求,只有保证三维绿量密度 $\geq 5\text{m}^3/\text{m}^2$ 时,才能起到有效的降温增湿作用。因此,能够发挥最佳降温增湿功能的城市绿地群落配置模式应该为群落郁闭度在0.60~0.85之间,三维绿量密度不小于 $5\text{m}^3/\text{m}^2$ 的乔灌木或乔草复层配置结构。

4.2 讨论

虽然生长良好的成片绿地和树林能有效吸收和阻挡太阳辐射,调节大气湿度,改善环境舒适度。但是,这种降温增湿功能不仅与绿地类型、郁闭度和绿量有关,而且与区域自然环境条件、绿地种植形式以及空间布局(比如绿地斑块形状)等有关,比如南方湿润多雨气候与北方干旱少雨条件下绿地群落降温增湿功能有何差异,带状与片状绿地降温增湿效果差异,以及绿地斑块面积、形状和景观指数对降温增湿功能的影响等都有待深入研究。此外,该研究结论是基于24个样地降温增湿平均值得出的,有些样地观测数据过高可能会导致整个群落的降温增湿功能偏高,因此需要增加更多的样地观测结果加以验证。而且,绿地斑块对周围地区的影响存在一个范围,本研究在绿地空间温湿

度测定时的样地梯度设置的合理性也有待验证和分析。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国建设部. CJJ/T85-2002城市绿地分类标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002. [Ministry of Construction of the People's Republic of China. CJJ/T85-2002 Standard for Classification of Urban Green Space[S]. Beijing: China Building Industry Press,2002.]
- [2] 张彪,高吉喜,谢高地,等. 北京城市绿地的蒸腾降温功能及其经济价值评估[J]. 生态学报,2012,32(24):7698-7705. [Zhang B, Gao J X, Xie G D, et al. Preliminary evaluation of air temperature reduction of urban green spaces in Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2012,32(24):7698-7705.]
- [3] Zhang B, Xie G D, Gao G X, et al. The cooling effect of urban green spaces as a contribution to energy-saving and emission-reduction: A case study in Beijing, China[J]. *Building and Environment*,2014,76:37-43.
- [4] Jim C Y, Chen W Y. Assessing the ecosystem service of air pollutant removal by urban trees in Guangzhou (China)[J]. *Journal of Environmental Management*,2008,88(4):665-676.
- [5] 陈龙,谢高地,盖力强,等. 道路绿地消减噪声服务功能研究-以北京市为例[J]. 自然资源学报,2011,26(9):1526-1534. [Chen L, Xie G D, Gei L Q, et al. Research on noise reduction service of road green spaces-a case study of Beijing[J]. *Journal of Natural Resources*,2011,26(9):1526-1534.]
- [6] 张彪,谢高地,薛康,等. 北京城市绿地调蓄雨水径流功能及其价值评估[J]. 生态学报,2011,31(13):3839-3845. [Zhang B, Xie G D, Xue K, et al. Evaluation of rainwater runoff storage by urban green spaces in Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2011,31(13):3839-3845.]
- [7] Zhang B, Xie G D, Zhang C Q, et al. The economic benefits of rainwater runoff reduction by urban green spaces: A case study in Beijing, China[J]. *Journal of Environment Management*,2012,100(10):65-71.
- [8] 夏宾,张彪,谢高地,等. 北京建成区公园绿地的房产增值效应评估[J]. 资源科学,2012,34(7):1347-1353. [Xia B, Zhang B, Xie G D, et al. The value-added effect of park green space on residential property in Beijing[J]. *Resources Science*,2012,34(7):1347-1353.]
- [9] 张灿强,张彪,李文华,等. 北京城区绿地防灾避险功能评估[J]. 地理研究,2012,31(12):2301-2309. [Zhang C Q, Zhang B, Li W H, et al. Analysis of the disaster prevention and reduction functions of urban green spaces in Beijing City[J]. *Geographical Research*,2012,31(12):2301-2309.]

2016年6月

- [10] Zhang B. The Climate Change, Water Crisis and Forest Ecosystem Services in Beijing, China[A]. Blanco J A, Kheradmand H. Climate Change-Socioeconomic Effects[M]. Rijeka; InTech, 2011.
- [11] Kuang WH, Liu Y, Dou Y, et al. What are hot and what are not in an urban landscape: Quantifying and explaining the land surface temperature pattern in Beijing, China[J]. *Landscape Ecology*, 2014, 30(2): 1-17.
- [12] Huang G, Zhou W, Cadenasso ML. Is everyone hot in the city? Spatial pattern of land surface temperatures, land cover and neighborhood socioeconomic characteristics in Baltimore, MD[J]. *J Environ Manage*, 2011, 92(7): 1753-1759.
- [13] Zoulia I, Santamouris M, Dimoudi A. Monitoring the effect of urban green areas on the heat island in Athens[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 156(1-4): 275-292.
- [14] Shashua-Bar L, Potchter O, Bitan A, et al. Microclimate modelling of street tree species effects within the varied urban morphology in the Mediterranean city of Tel Aviv, Israel[J]. *International Journal of Climatology*, 2010, 30(1): 44-57.
- [15] Oliveira S, Andrade H, Vaz T. The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon[J]. *Building and Environment*, 2011, 46(11): 2186-2194.
- [16] 李辉, 赵卫智, 古润泽, 等. 居住区不同类型绿地释氧固碳及降温增湿作用[J]. *环境科学*, 1999, 20(11): 41-44. [Li H, Zhao W Z, Gu R Z, et al. Effects of three different green-lands in plantation structure on the O_2 -emitting, CO_2 -fixing, heat-absorbing and temperature-decreasing in residential quarters[J]. *Environmental Science*, 1999, 20(11): 41-44.]
- [17] 吴菲, 李树华, 刘剑. 不同绿量的园林绿地对温湿度变化影响的研究[J]. *风景园林调查与研究*, 2006, 22(7): 56-60. [Wu F, Li S H, Liu J. Effects of urban green space with different vegetation quantity on temperature and humidity[J]. *LA Investigation and Research*, 2006, 22(7): 56-60.]
- [18] 马秀梅, 李吉跃. 不同绿地类型对城市小气候的影响[J]. *河北林果研究*, 2007, 22(2): 210-226. [Ma X M, Li J Y. Influences of different green lands on urban microclimate[J]. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research*, 2007, 22(2): 210-226.]
- [19] 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 J M, Li S H, Yang Z F. Temperature and humidity effect of urban green spaces in Beijing in summer[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(11): 1972-1978.]
- [20] 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 M L, Qin J, Hu Y H. Effects of temperature reduction and humidity increase of plant communities in Shanghai[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30(2): 39-43.]
- [21] 杨萍, 刘伟东, 侯威. 北京地区极端温度事件的变化趋势和年代际演变特征[J]. *灾害学*, 2011, 26(1): 60-64. [Yang P, Liu W D, Hou W. The trend and inter-decadal evolution of extreme temperature events in Beijing area[J]. *Journal of Catastrophology*, 2011, 26(1): 60-64.]
- [22] 张彪, 高吉喜, 谢高地, 等. 北京城市绿地的蒸腾降温功能及其经济价值评估[J]. *生态学报*, 2012, 32(24): 7698-7705. [Zhang B, Gao J X, Xie G D, et al. Preliminary evaluation of air temperature reduction of urban green spaces in Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(24): 7698-7705.]
- [23] Pu R, Yu Q, Gong P, et al. EO-1 Hyperion, ALI and Landsat 7 ETM+ data comparison for estimating forest crown closure and leaf area index[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(3): 457-474.
- [24] 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. [Zhou T G, Luo H X, Guo D Z. Remote sensing image-based quantitative study on urban spatial 3D Green Quantity Virescence three-dimension quantity[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 415-420.]
- [25] 朱春阳, 李树华, 纪鹏, 等. 城市带状绿地宽度与温湿效益的关系[J]. *生态学报*, 2011, 31(2): 383-394. [Zhu C Y, Li S H, Ji P, et al. Effects of the different width of urban green belts on the temperature and humidity[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(2): 383-394.]

The relationship between urban green space community structure and air temperature reduction and humidity increase in Beijing

GAO Jixi¹, SONG Ting², ZHANG Biao³, HAN Yongwei², GAO Xinting², FENG Chaoyang²

(1. Nanjing Institute of Environmental Sciences of the State Environmental Protection Administration of China, Nanjing 210042, China;

2. Institute State Environmental Protection Key Laboratory of Regional Eco-process and Function Assessment of Ecology, Chinese Research of Environmental Sciences, Beijing 100012, China;

3. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China)

Abstract: With rapid urbanization in China, large areas of vegetated surfaces have been replaced by impervious built surfaces. The development of urban heat islands (UHIs) has recently become a critical environmental issue in many cities. Fortunately, trees and vegetation in an urban environment can greatly improve microclimates and mitigate UHI development by reducing summer air temperature. Although many recent studies have observed such ecosystem services as temperature reduction and humidity increase by urban green spaces, the relationship between community structure of urban green space and air temperature reduction and humidity increase remains unknown. This study investigated 24 typical green space communities and observed their role in temperature reduction and humidity increases, and the relationship between these roles and canopy density and green biomass. The results showed that green areas in Beijing reduce summer air temperature by 0.2~2.0 °C, and increase humidity 0.20%~8.26%. The urban green space with a Tree-Shrub-Grass structure can reduce temperature the most, followed by Tree-Grass and Tree. However, the urban green space with Tree structure increases humidity more than Tree-Shrub-Grass. There were clear relationships between canopy density and green biomass of urban green space and such roles as air temperature reduction and humidity increase. At the community scale, the canopy crown closure of green spaces had greater effects on urban temperature and humidity than green biomass. This study suggests that only when the canopy crown closure ranges from 0.60 to 0.85 and 3D green biomass density is larger 5m³/m² can urban green spaces provide maximal microclimatic benefits.

Key words: urban green space; community structure; temperature reduction and humidity increase; canopy density; three-dimension green quantity; Beijing City