

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201707024

引文格式: 余思玥, 魏家星, 王楠琪, 等. 南京市不同纯林群落结构参数与夏季降温增湿效应关系研究 [J]. 广西植物, 2018, 38(3):361–369
SHE SY, WEI JX, WANG NQ, et al. Correlation between community structure parameters of pure forests and temperature reduction and humidity increase in summer [J]. *Guihaia*, 2018, 38(3):361–369

南京市不同纯林群落结构参数与 夏季降温增湿效应关系研究

余思玥, 魏家星, 王楠琪, 贺奕尧, 姜卫兵*

(南京农业大学 园艺学院, 南京 210095)

摘要: 以往关于植物降温增湿效应主要基于绿带等大尺度测量和利用光合仪对叶片进行微观测量分析研究, 模糊了植物群落结构差异的影响。该研究基于纯林群落的小尺度实测, 采用 stata 虚拟变量回归分析法, 探讨了降温增湿作用与群落疏透度、郁闭度的影响关系, 并提出群落参数的最优阈值。结果表明: 郁闭度和降温、增湿作用均呈显著的正相关, 而疏透度和降温、增湿作用分别呈正相关和负相关, 但影响都不显著。郁闭度在 0.81~0.85, 疏透度在 0.31~0.35 时, 植物群落降温作用和增湿作用最优。同时, 该文将树种类型作为一个相关因素, 得出在降温作用上, 枫香林和紫荆林的降温效果和广玉兰林相比无显著差异, 而樱花林、鸡爪槭林、香樟林、红枫林的降温效果呈极显著性差异; 在增湿作用上, 桂花林、香樟林和红枫林的增湿效果和广玉兰林相比无显著差异, 而乌桕、紫荆林的增湿效果差异显著。该研究结果为通过城市绿化建设缓解热岛效应的植物配置选择提供了科学依据, 同时为城市绿地缓解热岛效应评价体系提供了量化的参考模式。

关键词: 纯林群落, 热岛效应, 郁闭度, 疏透度, 虚拟变量回归

中图分类号: Q948 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2018)03-0361-09

Correlation between community structure parameters of pure forests and temperature reduction and humidity increase in summer

SHE Siyue, WEI Jiaying, WANG Nanqi, HE Yiyao, JIANG Weibing*

(College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: In the early research, the temperature reduction and humidity increase of plants were mainly based on big scale measurement such as green belt and microcosmic research in the scale of leaves in use of photosynthesis equipment, ignoring the effects of tree types and structural characteristics of communities in the dimension of quantification. We investigated the correlation among the effects of temperature reduction and humidity increase, canopy porosity and density based on small scale of pure forest, using dummy variable regression analysis. Furthermore, in order

收稿日期: 2017-09-27

基金项目: 国家自然科学基金 (31200530) [Supported by the National Natural Science Foundation of China (31200530)]。

作者简介: 余思玥 (1993-), 女, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 主要从事园林植物生态与应用研究, (E-mail) 791016661@qq.com。

*通信作者: 姜卫兵, 教授, 主要从事园林园艺作物资源与生理生态研究, (E-mail) weibingj@njau.edu.cn。

to obtain certain conclusion in the range of our research, we also put forward the optimal interval of structural parameter. The results showed canopy density was significantly positively correlated with both temperature reduction and humidity increase. While canopy porosity was positively correlated with temperature reduction and negatively correlated with humidity increase, but there was no significant difference. The pure forests could elaborate maximum function of releasing thermal island effect when canopy porosity ranged from 0.81 to 0.85 and canopy density ranged from 0.31 to 0.35. At the same time, we took the types of pure tree as related factors. The results showed there was no significant difference among *Liquidambar formosana*, *Cercis chinensis* and *Magnolia grandiflora*. And we also found significant difference appeared in *Cerasus*, *Acer palmatum*, *Cinnamomum camphora* and *Acer palmatum* 'Atropurpureum' and *Cerasus* when it comes to temperature reduction effect. As for humidity increase that the pure forests played, we can see *Osmanthus fragrans*, *Cinnamomum camphora*, *Acer palmatum* 'Atropurpureum' showed no difference compared to *Magnolia grandiflora* while there were significant differences between *Sapium sebiferum* and *Cercis chinensis*. This study provides a scientific basis for the selection of plant configurations to alleviate the heat island effect through urban greening, and provides a quantitative reference model for the urban green space to mitigate the heat island effect evaluation system, which has far-reaching impact in the ecology field.

Key words: pure forests, thermal island effect, canopy density, canopy porosity, dummy variable regression

城市植被作为城市生态环境的重要组成部分,是构成城市生态系统中唯一执行自然“纳污吐新”负反馈机制的子系统。植物通过自身的光合、蒸腾等生理作用不仅可以调节小范围的空气质量,而且也可以调节小气候的温湿度。已有城市绿地生态功能的实证研究,证实了绿地降温增湿效应及其限制因子。例如,马秀梅和李吉跃(2007)利用便携式气象站分别测定城市林荫道、草坪和广场对小气候的影响,得出林荫道有较好的降温保湿效果;刘娇妹等(2008)的研究证实,只有在绿地覆盖率大于60%时,绿地的降温增湿效果才会明显,且乔灌木复合型绿地的效果优于纯草坪。因而作为城市绿地生态系统的组成部分,植被结构的优化配置对于改善城市热岛效应具有积极作用。

国内外学者已在不同绿化树种群落的降温增湿能力(Lin et al, 2010; 张明丽等, 2008; 韩焕金和周用武, 2007)、植物群落垂直类型的影响(马秀枝等, 2011; 纪鹏等, 2012)、植物群落冠层结构特征的影响(Peter & Mcfadden, 2010; 秦仲等, 2015)、城市公园绿地中乔木覆盖率的影响(朱春阳等, 2013; 纪鹏等, 2012)等方面对植物群落降温增湿的效应和限制因子进行了研究。研究机制集中在对单株叶片进行光合仪测定和大尺度的公园绿地的环境因子实测,尚缺乏对小尺度树种群落的研究

对象选择,而且样地选择城市公园纯林群落更为少见。目前,定量解析树种群落结构参数与缓解热岛效应的研究并不多见,且一般多为传统的定性描述为主,集中在相关性等浅显层面。前人大多采用传统散点图和相关性分析,彼此探究的因子相互独立,未能消除其相互影响以及形成直观的数据趋势变化图。

虚拟变量回归分析在生态学领域的应用,多集中在自然森林群落和城市气象监测点。如陶伟国等(2007)分类建立了产草量与4种植被指数的回归估产模型,找出了3种利用状况下的鲜草产量最优混合估算模型和估算指数。谢心庆和许英(2015)通过对西安市一个空气质量监测点添加虚拟变量及因子分析提取因子的方法,将强相关因素、提取的天气、温度、风力和风向因子与PM2.5浓度观测值进行回归预测。因此,通过对实测数据的整理和分析,引进虚拟变量回归分析法,能对城市园林与绿地规划研究中群落结构参数与其最优生态功能发挥之间的关系有较为清晰的认知。本研究选取了南京明外郭风光带示范段的9个纯林绿化树种,在植物群落结构特征相关参数调研的基础上,通过实时监测记录小环境的温度、相对湿度的变化,引入虚拟变量构建计量模型,比对不同群落结构降温增湿最优区间并检验估计结果,

为通过城市绿化建设缓解热岛效应的植物配置选择提供科学依据,同时为城市绿地缓解热岛效应评价体系提供量化的参考模式。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

位于长江下游的南京地区,属于北亚热带季风气候区,常年平均降雨 117 d,平均降雨量为 1 106.5 mm,相对湿度为 76%。年平均气温为 15.5 ℃,1 月份平均气温为 2.3 ℃,7 月份平均气温为 25.3 ℃。2015 年,全市空气质量达到二级标准的天数为 235 d,达标率为 64.4%,未达到二级标准的天数为 130 d,首要污染物为 PM2.5。

样地选择南京纯林群落特征最为典型,且建成时间一致的明外郭风光带的示范段(坐标 118°54′—118°55′E,32°6′ N)进行植物群落结构特征调研和大气颗粒物等数据测定。该样地所测气象数据与南京国家基准气候站(坐标 118°55′E,32°56′ N)的气象数据基本一致,占地 140 000 m²左右。随着大小龟山建设,大量种植广玉兰、桂花、樱花等树种,绿化覆盖率超过 80%。

1.2 样地选择

选择明外郭风光带示范段的有代表性、出现频率较高、树龄一致且具有良好生长势的 9 种单一纯林树种进行试验,试验群落的周围环境相似,下垫面一致,均为沿阶草、麦冬和杂草,林下植物覆盖率为 80%~90%。所试验的林带高度在 5.0~6.5 m 的范围,宽度为 50~70 m,样地距离林缘在 20~40 m 之间。在所选择的试验群落内划分出一个 30 m×30 m 的样方,按照东 西 南 北 四 个 方 向 均 匀 布 点 的 方 式 在 每 个 样 方 中 设 置 9 个 测 量 点。此外,为尽可能使对照点与各个群落的环境背景一致并排除其他因子的影响,将对照点设置为靠近公园大门的裸地,下垫面为混泥土,距离试验树种群落距离 50 m。为了保证测定数据的可靠性和可比性,所选群落立地条件相似、均远离水域和人工建筑,人可自由进入,且各群落内部树种结构、郁闭度、疏透度等特征具有一定差异,具体布点方式如下图 1,群落概况如下表 1。

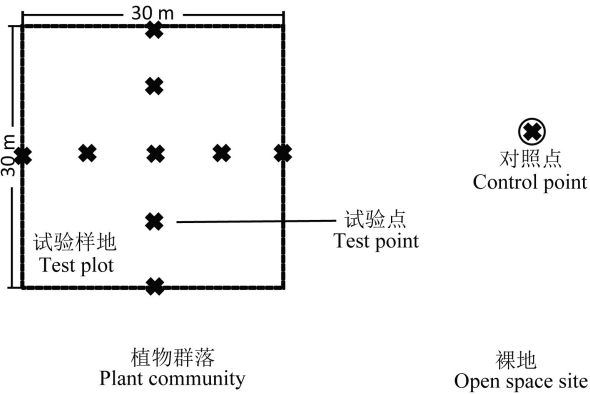


图 1 试验样地中试验点及对照点布置示意图
Fig. 1 Location of the test point and control open space site

1.3 虚拟变量回归模型构建

在经济计量分析中,利用回归模型方法对经济现象的变化进行描述、模拟和预测是经常使用的方法。虚拟变量的基本功能是将品质型数据转化为数值型数据,以便于将一些不能直接量化的因素引入到统计模型中加以研究。虚拟变量模型的基本应用主要在三个方面:一是对事物的结构变化进行分析;二是构造分段回归模型;三是刻画属性变量间的交互效应。

影响树种群落发挥其缓解热岛效应的主要因素有郁闭度、疏透度和树种种类等。而这些特征参数又是互相影响的,采用传统的单一散点图并不能综合反映这些变量相互影响的效应。因此,本研究首先量化虚拟变量,构造分段回归模型,分别建立温湿度与两个群落结构参数以及树种种类的回归方程,然后列表得出基于虚拟变量的每个测量指标的回归模型结果,从而找到群落发挥不同生态功能所对应相对最优的群落结构参数区间。

采用 Xi 命令定义降温量、增湿量均值为 y,分别建立每个生态功能绩效值和三个自变量的耦合回归方程表达式。对应方程表达式如下:

$$y = \sum_{i=2}^7 a_i vcc_i + \sum_{j=2}^7 b_j vcp_j + \sum_{k=2}^9 c_k type_k + cons$$

式中,a_i,b_j,c_k分别为自变量 vcc、vcp、type 的系数,规定 vcc1、vcp1、type1 为试验点内部的对照

表 1 试验样地不同纯林树种调查

Table 1 Investigation of species from pure forests in trial site

纯林树种 Species in pure forest	平均冠幅 ACD (m)	平均胸径 ADBH (cm)	郁闭度 CD	疏透度 CP	纯林树种 Pure forest	平均冠幅 ACD (m)	平均胸径 ADBH (m)	郁闭度 CD	疏透度 CP
鸡爪槭 <i>Acer palmatum</i>	2.91 ± 0.21	11.03 ± 1.27	0.70 ± 0.05	0.50 ± 0.05	枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	3.68 ± 0.52	13.69 ± 0.72	0.81 ± 0.10	0.35 ± 0.09
樱花 <i>Cerasus</i>	2.52 ± 0.27	10.19 ± 0.61	0.77 ± 0.10	0.37 ± 0.07	红枫 <i>Acer palmatum ‘Atropurpureum’</i>	2.49 ± 0.20	7.43 ± 0.35	0.76 ± 0.10	0.37 ± 0.08
乌桕 <i>Sapium sebiferum</i>	3.52 ± 0.66	14.80 ± 1.71	0.85 ± 0.04	0.38 ± 0.02	香樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	4.25 ± 0.33	22.02 ± 1.46	0.73 ± 0.12	0.44 ± 0.12
广玉兰 <i>Magnolia grandiflora</i>	3.34 ± 0.27	13.95 ± 0.89	0.76 ± 0.12	0.40 ± 0.02	紫荆 <i>Cercis chinensis</i>	3.05 ± 0.20	10.50 ± 0.68	0.83 ± 0.06	0.32 ± 0.05
桂花 <i>Osmanthus fragrans</i>	2.61 ± 0.56	10.40 ± 1.13	0.87 ± 0.07	0.21 ± 0.03					

注: ACD. 平均冠幅; ADBH. 平均胸径; CD. 郁闭度; CP. 疏透度。下同。

Note: ACD. Average crown diameter; ADBH. Average diameter at breast height; CD. Canopy density; CP. Canopy porosity. The same below.

组,由于第一组所有虚拟变量均取 0,因此常数项表示第一组的均值。

1.4 数据描述

1.4.1 测试时间及指标 为消除天气变化可能带的误差,本研究选择晴朗无风或微风的典型夏季炎热天气(午间最高温达到 41 ℃),试验周期为 2016 年 7 月 30 日—8 月 1 日连续 3 d;在常规游憩时间(8:00—18:00)内,每隔 2 h 进行测定。测试指标为群落内植物胸径、冠幅、郁闭度、疏透度以及空气温度、相对湿度。本研究中将增温降湿量定义为与对照点的差值绝对值。具体公式如下:

降湿量=对照点日均温度值-试验点日均温度值,增湿量=试验点日均湿度值-对照点日均湿度值。

1.4.2 测量方法 采用 NK4000 手持式移动气象站测定各样点空气温度、相对湿度,测量高度为 1.5 m(人体对环境因子最敏感的感知高度),每个样点每时间点重复测量 3 次,取平均值为该试验点的实测值。

遵循“典型性、代表性、一致性”原则,在每个群落的试验点实地测量记录其胸径、冠幅、树高和枝下高取平均值,以便掌握其群落结构及相关参数。

测量群落郁闭度和疏透度主要借助数字图像处理法。由于单一树林面积较大,不同位置的疏密程度存在一定差异,为了更好的记录每个试验点的所处环境差异,用数码相机(cannon 650D)拍摄所有试验点的垂直影像,计算透光孔隙在影像垂直面上的投影面积与林带要素投影总面积的比值,即得到该试验点的疏透度;保持镜头水平,外接鱼镜头在每个群落的 9 个测点处距离地面 1.5 m 向群落冠层拍照,将所得半球面冠层数字图像用 Adobe Photoshop CS6 进行相应的处理分析,得到该群落各个样点的郁闭度。

1.4.3 自变量确定 自变量设置为虚拟变量,包括试验点的郁闭度(vcc)、试验点的疏透度(vcp)、试验点所属的群落种类(type)。

1.4.4 虚拟变量赋值 (1)郁闭度(vcc):试验点所测得的郁闭度集合区间为 0.60~0.95,此变量为有序分类变量,故量化时派生出 6 个哑变量,分别为 vcc2(郁闭度 0.65~0.70)、vcc3(郁闭度 0.71~0.75)、vcc4(郁闭度 0.76~0.80)、vcc5(郁闭度 0.81~0.85)、vcc6(0.86~0.90)、vcc7(郁闭度 0.91~0.95)。(2)疏透度(vcp):试验点所测得的郁闭度集合区间为 0.15~0.60,此变量为有序分类

变量,根据其分布频率,量化时派生出 6 个哑变量,分别为 vcp2(疏透度 0.26~0.30)、vcp3(疏透度 0.31~0.35)、vcp4(疏透度 0.36~0.40)、vcp5(疏透度 0.41~0.45)、vcp6(疏透度 0.46~0.50)、vcp7(疏透度 0.51~0.60)。(3)群落树种种类(type):试验样地一共有 9 个纯林,此变量为等量分布的无序变量,量化时派生出 8 个哑变量,分别为 type2(樱花)、type3(鸡爪槭)、type4(枫香)、type5(乌桕)、type6(桂花)、type7(紫荆)、type8(香樟)、type9(红枫)。

2 结果与分析

2.1 降温量回归方程及相关性的检验

降温量在显著水平为 1%的情况下通过了 F 检验,试验回归结果达到极显著差异($P<0.01$),且 $R^2=0.88$,说明曲线的整体回归拟合结果较好。

从表 2 可以看出,郁闭度前的系数均为正值,说明其与降温量成正相关关系,且系数也呈增大趋势,说明在一定程度上郁闭度增大能增加对降温量的正向影响。在 1%的水平上呈极显著性差异。说明在一定范围内,随着试验点郁闭度的增加,植物群落温度与对照裸地的差值越大,其日均温度越低,降温效果越好。疏透度前的各项系数也为正值,说明疏透度对降温量有正面影响,在 0.26~0.35 区间达到 10%差异显著水平,在 0.46~0.50 区间上呈极显著,说明疏透度对此区间的降温影响最大。从表 2 可以看出,树种之间的显著性测试可以看出,枫香林和紫荆林的降温效果和广玉兰林相比无显著差异,而樱花林、鸡爪槭林、香樟林、红枫林的降温效果呈极显著性差异。

2.2 增湿量回归方程及相关性的检验

相对湿度变化值为百分数,将百分数换算导入 stata 软件进行计算。增湿量在显著水平为 1%的情况下试验回归结果通过了 F 检验,达到极显著差异($P<0.01$),且 $R^2=0.84$,说明曲线的整体回归拟合结果较好。由表 3 可知,郁闭度变量前的参数均为正,即郁闭度和增湿量成正相关关系,且均具有显著相关性。疏透度变量前的参数均为负,表示疏透度对增湿量有着负面影响,即在一定

表 2 郁闭度、疏透度、纯林树种与降温量的回归分析表
Table 2 Regress of canopy density, canopy porosity, species in pure forests and decreased amount of temperate

结构参数 Structure parameter	区间 Section	各项系数 Coefficient	标准差 Standard deviation
郁闭度 Canopy density (CD)	0.65~0.70	0.852 ***	0.259
	0.71~0.75	0.981 ***	0.270
	0.76~0.80	1.123 ***	0.250
	0.81~0.85	1.215 ***	0.251
	0.86~0.90	1.680 ***	0.242
	0.91~0.95	1.579 ***	0.277
疏透度 Canopy porosity (CP)	0.26~0.30	0.630 *	0.342
	0.31~0.35	0.595 *	0.353
	0.36~0.40	-0.079	0.358
	0.41~0.45	0.012	0.367
	0.46~0.50	0.926 **	0.387
	0.51~0.60	0.518	0.408
树种 Species	樱花 <i>Cerasus</i>	-1.717 ***	0.273
	鸡爪槭 <i>Acer palmatum</i>	-0.866 ***	0.287
	枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	0.379	0.292
	乌桕 <i>Sapium sebiferum</i>	1.897 ***	0.265
	桂花 <i>Osmanthus fragrans</i>	0.740 *	0.423
	紫荆 <i>Cercis chinensis</i>	0.178	0.287
	香樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	-0.535 *	0.302
	红枫 <i>Acer palmatum</i> 'Atropurpureum'	-1.376 ***	0.260
	常数项 Constants	1.309 ***	0.438

注: ***, **, * 分别表示 1%、5%和 10%的统计显著性水平。下同。

Note: ***, **, * represent statistically significant significances at 1%, 5% and 10% level, respectively. The same below.

范围内,群落横截面的孔隙率越大,空气流通越活跃,导致增湿效果变差,但显著性较低。从表 3 中树种虚拟变量的 P 值分布看出,桂花林、香樟林和红枫林的增湿效果和广玉兰林相比无显著差异,而

表 3 郁闭度、疏透度、树种与增湿量的回归分析表
Table 3 Regress of canopy density, canopy porosity, species
in pure forests and increased amount of humidity

结构参数 Structure parameter	区间 Section	各项系数 Coefficient	标准差 Standard deviation
郁闭度 Canopy density (CD)	0.65~0.70	0.001 **	0.005
	0.71~0.75	0.010 *	0.005
	0.76~0.80	0.013 ***	0.004
	0.81~0.85	0.020 ***	0.004
	0.86~0.90	0.023 ***	0.004
	0.91~0.95	0.026 ***	0.005
疏透度 Canopy porosity (CP)	0.26~0.30	-0.005 *	0.006
	0.31~0.35	-0.003 *	0.006
	0.36~0.40	-0.007	0.007
	0.41~0.45	-0.012 *	0.008
	0.46~0.50	-0.006	0.007
	0.51~0.60	-0.011	0.007
树种 Species	樱花 <i>Cerasus</i>	-0.011 **	0.005
	鸡爪槭 <i>Acer palmatum</i>	-0.013 **	0.005
	枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	0.019 ***	0.005
	乌柏 <i>Sapium sebiferum</i>	0.017 ***	0.005
	桂花 <i>Osmanthus fragrans</i>	0.002	0.008
	紫荆 <i>Cercis chinensis</i>	0.019 ***	0.005
	香樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	0.002	0.005
	红枫 <i>Acer palmatum</i> 'Atropurpureum'	-0.003	0.005
	常数项 Constants	0.023 ***	0.008

乌柏林、紫荆林的增湿效果差异显著。

2.3 基于虚拟变量的回归模型均值分析

在植物群落生态学中,郁闭度和疏透度是表征植物群落结构疏密程度的常用参数指标。为了更深入地探究不同纯林对降温增湿的具体影响趋势,找到植物发挥不同生态效益所对应郁闭度和疏透度的相对较优区间,我们用列表法对这两个

变量回归模型的均值进行了分析。

2.3.1 郁闭度、疏透度与降温量的回归模型均值

从表 4 可以看出,排除个别值影响,对于同一疏透度区间,随着郁闭度的增加,试验点降温量大体上呈现增加趋势,较低郁闭度的降温量总量明显小于较高郁闭度对应的降温量。表 4 表明,郁闭度达到 0.9 以上,降温量反而呈现下降趋势。说明基于外界环境和植物自身生长特性的综合因素影响,在一定测度范围的群落内,植物种植密度越大,对温度的降低效果越好;但是如果种植过于紧密,不利于植物群落内部空气扩散和流通,导致降温效果受到影响。为使增湿量保持在一个较高的水平,群落郁闭度的最优区间为 0.81~0.85,此时对应疏透度的最优区间为 0.31~0.35。

2.3.2 郁闭度、疏透度与增湿量的回归模型均值

从表 5 可以看出,排除个别值影响,对于同一疏透度区间,随着郁闭度的增加,试验点增湿量呈现显著的增加趋势,即与郁闭度的正相关性显著。而较低疏透度整体的增湿量大于较高疏透度,对增湿效果表现出一定的负面影响。综上所述,为使增湿量保持在一个较高的水平,此时群落郁闭度的最优区间为 0.81~0.85,疏透度的最优区间为 0.31~0.35。

3 讨论

植物群落可通过自身的冠层结构和生理活动,反射和吸收部分太阳辐射,使地面接收的净辐射减少,且吸收的净辐射通过蒸腾作用和光合作用等生理过程转化为化学能,从而影响地表的热量平衡状况,使环境热量显著减少。周立晨等(2005)、高凯等(2009)、秦仲等(2015)研究结果得到叶面积指数和郁闭度与温湿效应呈显著相关。秦仲等(2012)通过对北京植物园 14 个植物群落的温湿度进行测定,得出郁闭度与群落降温效应呈极显著正相关,与增湿效应呈正相关但不显著。而本研究增加了对疏透度的探究,得出在夏季,郁闭度对降温增湿作用均有显著的正相关影响,而疏透度与降温增湿作用分别呈正相关和负相关,但影响都不显著。可能是因为夏季群落横

表 4 郁闭度、疏透度与降温量的回归模型均值表

Table 4 Mean values from regression model of canopy density , canopy porosity and decreased amount of temperater

郁闭度 Canopy density (CD)	疏透度 Canopy porosity (CP)						
	0.15~0.25	0.26~0.30	0.31~0.35	0.36~0.40	0.41~0.45	0.46~0.50	0.51~0.57
0.60~0.64	—	0.6	0.3	1.7	0.1	1.9	1.2
0.65~0.67	0	2.6	2.7	2.0	1.5	2.6	2.4
0.71~0.75	3.6	2.6	1.2	2.2	1.1	3.1	1
0.76~0.8	3.6	3.8	3.1	2.9	1.9	2.1	1.7
0.81~0.85	2.1	2.2	4.2	3.9	2.7	3.8	2.7
0.86~0.9	3.9	4.1	3.7	2.8	2.7	1.7	3.1
0.91~0.95	3.3	3.8	3.3	2.6	2.7	—	—

注：表中缺失的值表示剔除了不符合树种正常生长情况以及实测试验点中不存在的情况。下同。
Note: Missing values in the table represent the exclusion of situation of abnormal growth of trees and the measured test point that do not exist. The same below.

表 5 郁闭度、疏透度与增湿量的回归模型均值表

Table 5 Mean values from regression model of canopy density , canopy porosity and increased amount of humidity

郁闭度 Canopy density (CD)	疏透度 Canopy porosity (CP)						
	0.15~0.25	0.26~0.30	0.31~0.35	0.36~0.40	0.41~0.45	0.46~0.50	0.51~0.57
0.60~0.64	—	0.010	0.004	0.014	0.001	0.033	0.005
0.65~0.67	0.009	0.019	0.019	0.021	0.0165	0.017	0.020
0.71~0.75	0.033	0.031	0.050	0.034	0.009	0.001	0.014
0.76~0.8	0.052	0.050	0.059	0.038	0.021	0.007	0.004
0.81~0.85	0.044	0.043	0.064	0.0505	0.030	0.055	0.034
0.86~0.9	0.050	0.055	0.054	0.0505	0.036	0.026	0.040
0.91~0.95	0.052	0.067	0.055	0.048	0.034	—	—

截面孔隙度大,透气性好,利于空气流动,导致温度降低迅速。而又因为外界空气进入潮湿的内部环境,带走了水汽,进而使群落内的相对湿度降低。

前人对于城市绿地的研究,一般集中在复杂的复合群落。由于单一树种群落和复合群落之间的差异,不同林木之间的相互作用叠加,以及植物所在生长区域周围环境的差异性,本研究结果同前人研究相似,但是不完全相同。张明丽等(2008)对上海市植物群落降温增湿效果的研究表

明,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。黄良美等(2008)通过对广西南宁市植物复合群落的小气候因子进行调研,得出在林荫处,植物群落总冠幅盖度、总密度、群落重要值均与温度成极显著的负相关;植物群落群落重要值还与相对湿度达到显著正相关。高吉喜等(2016)得出冠层郁闭度介于0.60~0.85的乔灌木或乔草绿地具有最大降温增湿功能。本研究进一步提出,纯林群落郁闭度在0.81~

0.85, 疏透度在 0.31~0.35 时, 纯林植物群落缓解热岛效应最好。此外在不同树种方面, 张明丽等 (2008) 研究表明, 柳杉、香榧、东方杉和广玉兰群落的增温降湿效果好, 桂花和雪松群落的降温增湿效果差; 马秀枝等 (2011) 对内蒙古校园内行道树研究发现, 垂柳和油松的降温增湿综合效应大于新疆杨。本研究将公园内的纯林群落作为一个相关因子, 得出了在降温作用上, 枫香林和紫荆林的降温效果和广玉兰林相比无显著差异, 而樱花林、鸡爪槭林、香樟林、红枫林的降温效果呈极显著性差异; 在增湿作用上, 桂花林、香樟林和红枫林的增湿效果和广玉兰林相比无显著差异, 而乌桕、紫荆林的增湿效果差异显著。并在后续群落结构最优区间的研究上, 最大程度地消减了群落种类对其造成的影响。如何应用虚拟变量方法进一步研究植物种类、群落结构参数与降温增湿的关系, 也是后续研究需重点关注的内容。

综上所述, 由于不同植物种类缓解热岛效应能力不同, 不同群落的郁闭度和疏透度等也不同, 所以结合区域特征、植物生长状况、群落结构以及树种种类进行综合选择, 合理配置植物, 可以有效消除城市热岛效应, 减少高温天气对环境及居民生活的影响。

虚拟变量回归分析在今后生态学跨学科领域的探索具有借鉴意义。目前虚拟变量回归分析在生态学领域的应用, 主要集中在自然森林群落 (陶伟国等, 2007) 和城市气象监测点 (谢心庆和许英, 2015)。由于面积较大, 一般运用遥感技术获取数据, 而城市纯林群落相对较小, 通过布点实时监测即能获取相关数据。此外, 城市绿化由于周边环境更为复杂, 且牵涉到的植被种类多样, 因而, 降低外界影响因子的干扰, 并对试验变量其进行分类分析显得更为重要。

本研究将经济学研究方法应用到传统生态学统计分析中, 消除了各因子的相互影响, 量化了群落结构参数和树种类型与降温增湿效果的关系方程, 并通过均值分布表探究其发挥最优效益的区间阈值, 为城市绿地缓解热岛效应评价体系提供了量化的参考模式, 建立多元协同的生态环境治理格局。

参考文献:

- GAO JX, SONG T, ZHANG B, et al, 2016. The relationship between urban green space community structure and air temperature reduction and humidity increase in Beijing [J]. *Resource Sci*, 38(6):1028-1038. [高吉喜, 宋婷, 张彪, 等, 2016. 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*, 38(6):1028-1038.]
- GAO K, QIN J, SONG K, et al, 2009. Fallen temperature effects at green patches of urban residential areas and analysis of its influence factors [J]. *J Plant Resource Environ*, 18(3):50-55. [高凯, 秦俊, 宋坤, 等, 2009. 城市居住区绿地斑块的降温效应及影响因素分析 [J]. *植物资源与环境学报*, 18(3):50-55.]
- HAN HJ, ZHOU YW, 2007. Cooling and moisturizing effect of different afforested tree species in July [J]. *J Hebei Agric Sci*, (5):28-30. [韩焕金, 周用武, 2007. 不同绿化树种的降温增湿效应 [J]. *河北农业科学*, (5):28-30.]
- HUANG LM, HUANG YY, LI H, et al, 2008. Analysis on the relation between the structural characteristics of plant communities and the microclimate effects in Nanning City, China [J]. *Guihaia*, 28(2):211-217. [黄良美, 黄玉源, 黎桦, 等, 2008. 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*, 28(2):211-217.]
- JI P, ZHU CY, LI SH, 2012. Effects of the different structures of green belts on the temperature and humidity in river corridors [J]. *Sci Silv Sin*, 48(1):58-65. [纪鹏, 朱春阳, 李树华, 2012. 河流廊道绿带结构的温湿效应 [J]. *林业科学*, 48(1):58-65.]
- JIANG WJ, 2000. The setting and application of dummy variable in regression model [J]. *Zhejiang Stat*, (12):13-14. [蒋文杰, 2000. 回归模型中虚拟变量的设定及应用 [J]. *浙江统计*, (12):13-14.]
- LIU JM, LI SH, YANG ZF, 2008. Temperature and humidity effect of urban green space in Beijing in summer [J]. *Chin J Ecol*, 27(11):1972-1978. [刘娇妹, 李树华, 杨志峰, 2008. 北京公园绿地夏季温湿效应 [J]. *生态学杂志*, 27(11):1972-1978.]
- LIN TP, TSAI K T, HWANG R L, 2010. Shading effect on long-term outdoor thermal comfort [J]. *Bldg Environ*, 45(1):213-221.
- LIU M, 2014. Application of dummy variable regression model: variance analysis and outlier test [J]. *Stat Decis*, (16):10-14. [刘明, 2014. 虚拟变量回归模型的应用: 方差分析及异常值检验 [J]. *统计与决策*, (16):10-14.]
- MA XM, LI JY, 2007. Influences of different green lands on urban microclimate [J]. *Hebei J For Orchard Res*, 22(2):210-226. [马秀梅, 李吉跃, 2007. 不同绿地类型对城市小气

- 候的影响 [J]. 河北林果研究, 22(2):210-226.]
- MA XZ, LI CS, CHEN GW, et al, 2011. The effects of reducing temperature and increasing humidity of greenery trees in inn Mongolia Agricultural University [J]. J Inn Mongol Agric Univ (Nat Sci Ed), 32(1):125-130. [马秀枝, 李长生, 陈高娃, 等, 2011. 校园内行道树不同树种降温增湿效应研究 [J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 32(1):125-130.]
- PETER EB, MCFADDEN JP, 2010. Influence of seasonality and vegetation type on suburban microclimates [J]. Urban Ecosyst, 13(4):443-460.
- QIN Z, LI ZD, CHENG FY, et al, 2015. Impact of canopy structural characteristics on inner air temperature and relative humidity of *Koelreuteria paniculata* community in summer [J]. Chin J Appl Ecol, 26(6):1634-1640. [秦仲, 李湛东, 成仿云, 等, 2015. 夏季栾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, 26(6):1634-1640.]
- QIN Z, BA CB, LI ZD, 2012. Effects of different plant communities on temperature reduction and humidity increase in Beijing [J]. Ecol Sci, (5):567-571. [秦仲, 巴成宝, 李湛东, 2012. 北京市不同植物群落的降温增湿效应研究 [J]. 生态科学, (5):567-571.]
- TAO WG, XU B, LIU LJ, et al, 2007. Yield estimation model for different utilization status grassland based on remote sensing data [J]. Chin J Ecol, (3):332-337. [陶伟国, 徐斌, 刘丽军, 等, 2007. 不同利用状况下草原遥感估产模型 [J]. 生态学杂志, (3):332-337.]
- XIE XQ, XU Y, 2015. Comprehensive prediction about PM_{2.5} concentrations in the atmosphere [J]. Electr Power Technol Environ Prot, (2):1-4. [谢心庆, 许英, 2015. 关于大气中 PM_{2.5} 浓度的综合预测 [J]. 电力科技与环保, (2):1-4.]
- YANG ZJ, 2012. The plight of environmental governance and the construction of the ecological government [J]. J Dalian Univ Technol (Soc Sci Ed), 33(3):103-107. [杨志军, 2012. 环境治理的困局与生态型政府的构建 [J]. 大连理工大学学报(社会科学版), 33(3):103-107.]
- ZHANG ML, QIN J, HU YH, 2008. Effects of temperature reduction and humidity increase of plant communities in Shanghai [J]. J Beijing For Univ, (2):39-43. [张明丽, 秦俊, 胡永红, 2008. 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, (2):39-43.]
- ZHOU LC, SHI WY, XUE WJ, et al, 2005. Relationship between vegetation structure and the temperature and moisture in urban green spaces of Shanghai [J]. Chin J Ecol, 24(9):1102-1105. [周立晨, 施文彧, 薛文杰, 等, 2005. 上海园林绿地植被结构与温湿度关系浅析 [J]. 生态学杂志, 24(9):1102-1105.]
- ZHU CY, JI P, LI SH, 2013. Relationship between urban green belt structure and temperature-humidity effect [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), (1):18-24. [朱春阳, 纪鹏, 李树华, 2013. 城市带状绿地结构类型对空气质量的影响 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), (1):18-24.]