

DOI: 10.5846/stxb202002180286

谢紫霞, 张彪, 余欣璐, 郝亮. 上海城市绿地夏季降温效应及其影响因素. 生态学报, 2020, 40(19): 6749–6760.

Xie Z X, Zhang B, She X L, Hao L. The summer cooling effect and its influencing factors of urban green spaces in Shanghai. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(19): 6749–6760.

上海城市绿地夏季降温效应及其影响因素

谢紫霞^{1,2}, 张 彪^{1,2,*}, 余欣璐³, 郝 亮⁴

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国人民大学, 北京 100872

4 长安大学, 西安 710054

摘要:城市绿地在夏季高温时具有明显降温作用,但在不同地区降温效果及其影响因子存在一定差异。以上海市为例,基于高分影像和实地观测,调查分析了 18 个典型绿地夏季降温效应及其关键影响因子。结果发现:上海城市绿地夏季日均降温 1.17—5.60℃,其中 67% 观测样地降温幅度低于平均值(2.51℃);绿地降温幅度与对照点的环境温度显著正相关,当外界环境温度低于 26℃ 时,城市绿地降温效应不明显;此外,城市绿地覆被格局对其降温效应有明显影响,当绿地乔木密度增加 5%、叶面积指数增大 1 或者水面比例增加 20% 时,可使夏季绿地降温率分别提高 1.73%、1.66% 和 1.18%。因此,在全球气候变暖背景下,优化提升上海城市绿地覆被格局可有效提升夏季绿地降温效应。

关键词:城市绿地;吸热降温;影响因子;上海市

The summer cooling effect and its influencing factors of urban green spaces in Shanghai

XIE Zixia^{1,2}, ZHANG Biao^{1,2,*}, SHE Xinlu³, HAO Liang⁴

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Renmin University of China, Beijing 100872, China

4 Chang'an University, Xi'an 710054, China

Abstract: Climate change is one of the most serious challenges in the 21st century. Accompanied by the rapid expansion of cities worldwide, the phenomenon of urban heat islands (UHI) has become a critical environmental issue in many large cities. The health consequences of UHI range from thermal discomfort to life-threatening medical conditions. Fortunately, trees and vegetation in the city can be considered as an ecological measure to cool cities. Although there are numerous studies on microclimate-adjusting effects of urban green spaces, the relationship of landscape pattern of urban green space and air temperature reduction is not fully addressed. In this study, by applying field measurement and high-resolution Google Earth Image, we investigated 18 typical green spaces and observed their role in temperature reduction. The results showed that the green space in Shanghai could reduce summer air temperature by 1.17—5.60℃, and approximately two-third green spaces provided a lower cooling effect than the average temperature reduction (2.51℃). The daily temperature reduction of green space was significantly positively correlated with the external ambient air temperature. However, the cooling effect of urban green space was lower when the ambient air temperature was cooler than 26℃. Tree density, leaf

基金项目:上海市环保科研项目

收稿日期:2020-02-18; 修订日期:2020-04-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangbiao@igsrr.ac.cn

area index (LAI), and waterbody proportion inside the green spaces presented the highest influences on the cooling rate. If there is a 5% increase in tree density, 1 increase in LAI or 20% increase in waterbody percentage, the temperature cooling rate of urban green space would be elevated by 1.73%, 1.66%, and 1.18%, respectively. Therefore, we advised the improvement of the cooling effect of urban green spaces in Shanghai through pattern optimization.

Key Words: urban green space; cooling effect; impact factor; Shanghai

全球气候变化和快速城市化是 21 世纪两大挑战,伴随产生的城市热岛问题引起广泛关注^[1-2]。城市绿地是指城市中以自然和人工植被为主的生态用地,具有固碳释氧^[3-4]、净化空气^[5-6]、调蓄雨水^[7-8]、改善小气候^[9-10]等重要功能。其中,绿色屋顶^[11-12]、街道树^[13-15]、城市公园^[15-16]以及水面湿地^[17-18]的小气候调节功能研究较为常见。比如 Oliveira^[19]等采用移动气象仪观测里斯本一个小公园(0.24 hm²)发现,公园内部与周围地区的最高气温差可达 6.9℃;Hathway 与 Sharples^[20]在英国谢菲尔德市(Sheffield)基于野外实测发现,在外界环境温度超过 20℃时,城内河流能使周围环境温度平均降低 1℃;Amani-Beni 等^[9]定点观测了北京奥林匹克公园树木、草坪和水面的气象要素,发现白天公园平均温度降低 0.48—1.12℃。不过,由于城市绿地降温功能易受绿斑块内外因素的复合影响,城市绿地覆被格局与其小气候效应的关系有待深入研究^[21-24]。

上海是我国人口超千万的特大城市之一,高温热浪事件近年明显增多^[1],城市热岛问题日益突出^[25],如何认识与发挥城市绿地的降温功能受到关注^[26-27]。比如张明丽等^[28]测定了上海市 14 个典型植物群落的降温增湿效果,结果发现柳杉群落降温能力最强,香榉、东方杉、广玉兰和香樟群落可降温 4.0—4.4℃。高凯等^[27]测定发现上海市 21 个居住区绿地斑块的中心温度在夏季高温季节要比周边低 2.6℃;秦俊等^[29]观测了上海居住区 23 种植物群落的降温增湿效应,结果表明针叶林、针阔混交林和竹林的降温效应最强,日均降温幅度大于 2.3℃。不过,以往研究注重揭示比较居住区绿地群落降温效果差异,而城市绿地降温效应及其关键影响因子的解析研究较少。

本文基于样地实测数据和高分辨率 Google Earth 影像,从绿地内外覆被格局及环境温度的影响,测定分析 18 个典型样地的夏季降温效应,重点解析地表覆被格局与环境温度对城市绿地降温效应的影响因子,为上海城市绿地规划管理提供参考依据。

1 研究区概况

上海市地处长江三角洲东南缘(30°40′—31°53′N,120°51′—122°12′E)、长江和钱塘江入海汇合处。全境除西南部有少数剥蚀残丘外,均为坦荡低平的长江三角洲平原,平均海拔 4 m 左右。上海市属于亚热带季风气候,2017 年平均气温 17.7℃,日照时间 1809.2 h,降水量达 1388.8 mm,降雨日达 124 d。上海市行政管辖面积 6340.50 km²,包括浦东新区、黄浦区、徐汇区等 16 个区(图 1),其中杨浦、虹口、静安等 7 个区为中心城区^[30]。2017 年末上海市常住人口 2418.33 万人,人口密度达到 3814 人/km²,其中黄浦区、虹口区、杨浦区、普陀区等人口密度均超 2 万人/km²^[31]。上海市地跨北亚热带和中亚热带,植被以常绿阔叶林与常绿落叶阔叶混交林为主。近年上海城市绿化建设加速,2017 年森林覆

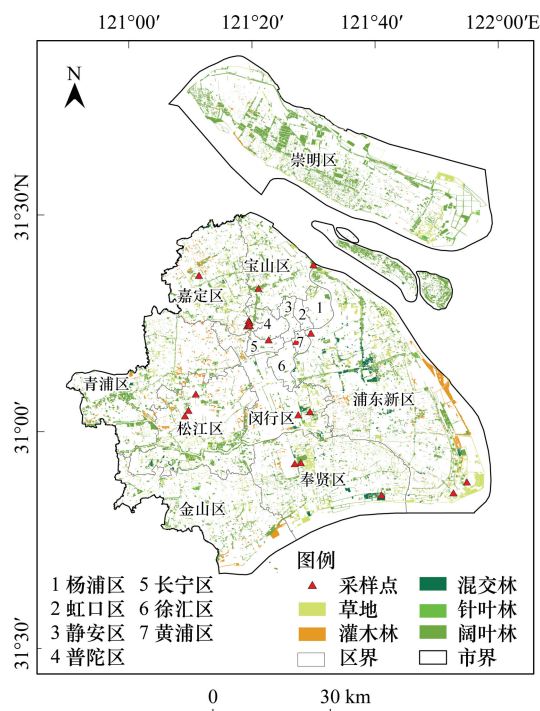


图 1 上海城市绿地空间分布及观测样地

Fig. 1 Distribution of green spaces and observed sites in Shanghai

盖率达到 16.2%,建成区绿化覆盖率达到 38.8%,人均公园绿地面积达到 8 m²/人^[31]。

2 研究方法

2.1 样地调查

城市绿地是城市中重要绿色基础设施^[32],主要由乔木林、灌木林和草地等组成。根据中国资源卫星应用中心陆地观测卫星数据平台的高分 2 号卫星 38 景影像,解译提取 2017 年上海市绿地资源分布数据(图 1),并选取公园绿地分布集中、植被结构类型复杂、调查人员易进入的 18 个观测样地(表 1)。在每个样地内,选择样地中心、群落结构较好的绿地斑块作为调查样方,其中乔木样方设置为 20 m×20 m,记录代表性乔木种类,测量每株乔木的树高、胸径、冠幅和枝下高;沿乔木样方内对角线分别设 3 个 3 m×3 m 的样方开展灌木调查,记录所有灌木种类、株数、高度及目测灌木盖度;在灌木样方内分别设置 2 个 1 m×1 m 的样方进行草本调查,测量并记录草本植物的高度、覆盖面积,目测估算草皮盖度。此外,观测样地叶面积指数通过 LAI-2200 植物冠层分析仪获取,按照乔木对角线在冠层下方的同一水平面上(距地面 1.5 m 左右)测量 15—20 次,并取相应平均值。

表 1 上海城市绿地观测样地情况
Table 1 Characteristics of observed green sites in Shanghai

样地名称 Green space	简称 Abbreviation	观测点特征 Features of observation site					对照点特征 Features of reference site
		样地面积 Area/hm ²	乔木胸径 Diameter at breast height/cm	乔木高度 Tree height/m	乔木株数 Tree number/株	植被优势种 Dominant species	
双桥公园	SQP	0.64	20.23	7.80	10	香樟、银杏、雪松、金边黄杨、桂花、结缕草、沿阶草	公园边道路,有少量街道树
京沪高速绿地	GGE	1.11	27.00	11.29	33	杨树、雪松、女贞、红叶李、石楠、金边黄杨、麦冬	工业用地道路,有街道树,建筑物密度低
顾村公园	GCP	187.21	13.31	8.22	34	香樟、喜树、乌桕、重阳木、桂花、萱草、白三叶	公园门口广场,建筑物密度与楼层均低
嘉北郊野公园	JCP	8.77	18.78	7.2	28	香樟、水果蓝、八角金盘、杜鹃、鸢尾、蒲苇	公园内部道路,有水稻,无建筑物
长风滨河绿地	CRG	3.47	27.60	9.76	23	银杏、女贞、紫薇、凤尾竹、紫薇、大吴风草、狗牙根	绿地边道路,有少量街道树
浦江郊野公园	PCP	10.91	13.94	5.97	28	朴树、女贞、乌桕、沼生栎、碧桃、桂花、石楠、大花六道木	公园内广场,有街道树和裸露地面
吴泾公园	WJP	5.08	20.28	8.65	26	栎树、合欢、乌桕、红叶李、樱花、小叶黄杨、麦冬、地毯草、吉祥草	公园门口道路,有高大街道树和住宅区
滴水湖公园	DSP	542.49	11.46	5.20	59	水杉、栎树、麦冬、白茅、狗牙根	公园外道路交叉口,有小片绿地和商业区
东海大桥高速绿地	GSE	1.56	14.14	6.35	28	女贞、构树、香樟、乌桕、紫薇、金边黄杨、狗牙根	高速公路边,有工业区和裸露地面
海湾国家森林公园	BNP	694.69	22.89	6.33	39	乌桕、香樟、臭椿、庙台枫、海桐、狗尾巴草	公园门口广场,有高大乔木
航南公路绿地	GHR	42.23	11.72	7.75	61	银杏、杜英、海棠、香樟、乌桕梅、结缕草	绿地边道路,有裸露土地
奉浦四季生态园	FEP	16.48	22.94	6.75	17	冷杉、榔榆、银杏、樱花、杏树、海桐、沿阶草、狗牙根	园外道路交叉口,有街道树
昆秀湖湿地公园	KWP	23.11	26.74	10.10	9	香樟、栎树、樱花、鸡爪槭、牛筋草、地锦草	公园门口道路,有施工建筑物
广富林郊野公园	GFP	239.86	19.92	9.63	24	栎树、香樟、枫香、女贞、樱花、海棠、小叶黄杨、结缕草	公园外道路,有街道树
佘山国家森林公园	SNP	121.67	26.69	10.27	32	香樟、雪松、构树、梧桐、桂花、女贞、小叶黄杨、麦冬、大吴风草	公园门口广场,东侧有高大乔木
复兴公园	FXP	8.89	29.82	11.84	24	香樟、广玉兰、雪松、白玉兰、悬铃木、樱花、杜鹃、麦冬、吉祥草	公园外道路交叉口,有街道树和商业区
陆家嘴东路绿地	GLR	1.10	21.16	6.45	20	香樟、玉兰、紫薇、石楠、凤尾竹、杜鹃、地毯草、蔓长春花	绿地边道路,建筑物楼层与密度均高
吴淞炮台湾湿地森林公园	WWP	53.31	24.15	9.89	51	水杉、雪松、朴树、构树、无患子、柳树、夹竹桃、构骨、麦冬	住宅区道路,有街道树和建筑物

2.2 降温观测

试验仪器为 2 台 Kestrel NK4500 手持气象仪,架设高度距离地面 1.5 m。仪器温度精度为±1℃,分辨率为 0.1℃,测量范围为 29—70℃,且测量前对两台仪器进行校正以保证误差小于 0.1℃。一台气象仪时安装于观测绿地样地中心,另一台放置在距离绿地边缘 20 m 以外的开阔裸地作为对照点。在 2018 年 7—8 月份晴朗少云微风(风速<3 m/s)、气温高于 30℃ 的日期开展气象观测,每天观测时间为 8:00—18:00,每分钟记录一个数据,并于每小时计算该时段内温度平均值。如果观测当天局部时间段出现降雨,则去掉该时间段。观测记录的数据使用 R studio 3.4 绘制相关图,进行相关检验与多元回归分析,观测样地降温效应采用日均降温幅度(T_r)和日均降温率(T_p)表示,计算公式为:

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

式中, T_{ci} 为对照点第*i*时刻的温度值(℃), T_i 为绿地观测点第*i*时刻的温度值(℃),*n* 为有效记录时间段(*n* ≤ 10)。

2.3 格局因子

根据城市绿地降温功能的潜在影响因素^[16, 33-34],本文选择观测点绿地面积、叶面积指数、乔木密度、灌木盖度、草坪盖度、水面比例、不透水面比例和对照点硬化地面比例与交通用地比例作为地表覆被格局因子,并基于样方植被调查和 Google Earth 影像提取相应覆被格局信息。不过格局因子计算需要确定影响区域范围,Cheung 和 Jim^[35]认为城市公园空气温度可通过其周围 20 m 内土地覆盖特征反应出来,Konarska 等^[36]通过选取 10—150 m 为半径的圆形缓冲区获取格局因子,有些研究则通过遥感影像获取公园内各类土地覆被比例^[15, 26, 37]。考虑到水体比例的缓冲区半径过小会导致各绿地缓冲区内水体含量差异不明显,所以将 200 m 设置为水体缓冲区半径(表 2)。

表 2 地表覆被格局参数及其获取方法
Table 2 Parameters of landscape pattern and acquired source

位置 Position	格局因子 Landscape parameters	单位 Unit	定义 Definition	获取方法 Method
观测点 Observation site	样地面积	m ²	观测点所在的城市绿地样地面积	Google Earth 测算
	叶面积指数		观测点 20 m×20 m 样方内单位土地面积上植物叶片总面积占土地面积的倍数	样地调查
	乔木密度	株/m ²	观测点 20 m×20 m 样方内单位土地面积上乔木株数(树高≥5 m)	样地调查
	灌木盖度	%	观测点 20 m×20 m 样方内灌木垂直投影的面积占地表面积的比率	样地调查
	草地盖度	%	观测点 20 m×20 m 样方内草本垂直投影的面积占地表面积的比率	样地调查
	水面比例	%	观测点 200 m 缓冲区内水面面积所占比例	Google Earth 测算
对照点 Reference site	不透水面比例	%	观测点 20 m 缓冲区内不透水面面积所占比例,主要为绿地内人行道路和广场,不包括林冠覆盖面积	Google Earth 测算
	交通用地比例	%	对照点 20 m 缓冲区内交通用地面积所占比例,主要为车辆通行道路,不包括人行道	Google Earth 测算
	硬化地面比例	%	对照点 20 m 缓冲区内硬化地表面积所占比例,主要为商业区、工业区、广场、住宅区、人行道等,不包括街道树覆盖面积	Google Earth 测算

3 结果分析

3.1 绿地降温幅度

观测结果表明,上海城市绿地夏季日均降温 1.17—5.60℃,平均降温幅度 2.51℃(图 2)。其中,滴水湖(DSP)降温幅度最大,为 5.60℃,相对降温率达到 16%;双桥公园(SQP)降温最小,为 1.17℃,相对降温率仅有 3.8%。另外,降温幅度高于平均值的有滴水湖公园(DSP)、顾村公园(GCP)、广富林郊野公园(GFP)、佘山国家森林公园(SNP)、复兴公园(FXP)和吴淞炮台湾湿地森林公园(WWP);降温幅度在 2—2.51℃的有海湾国家森林公园(BNP)、京沪高速公路绿地(GGE)、航南公路绿地(GHR)和昆秀湖湿地公园(KWP);长风滨河绿地(CRG)、嘉北郊野公园(JCP)、浦江郊野公园(PCP)、吴泾公园(WJP)、双桥公园(SQP)、东海大桥高速绿地(GSE)、奉浦四季生态园(FEP)和陆家嘴东路绿地(GLR)的降温幅度小于 2℃。可见,观测样地中 67%的绿地斑块降温幅度低于平均值(2.51℃)。

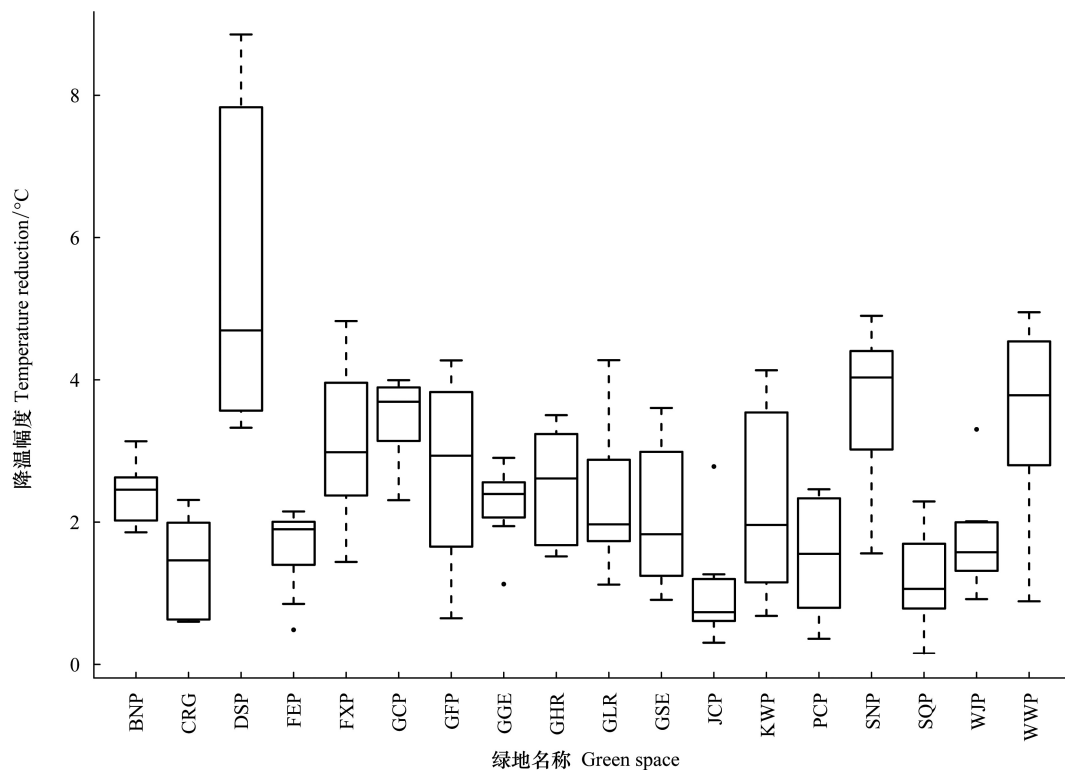


图 2 观测样点降温幅度箱线图

Fig.2 Box plots of reduced temperature in 18 observed sites

BNP:海湾国家森林公园, Bay National Forest Park; CRG:长风滨河绿地, Changfeng Riverside Green Space; DSP:滴水湖公园, Dishuihu Park; FEP:奉浦四季生态园, Fengpu Four Seasons Ecological Park; FXP:复兴公园, Fuxing Park; GCP:顾村公园, Gucun Park; GFP:广富林郊野公园, Guangfulin Country Park; GGE:京沪高速公路绿地, Green Space along G2 Expressway; GHR:航南公路绿地, Green Space along Hangnan Road; GLR:陆家嘴东路公园, Green Space along Lujiazui East Road; GSE:东海大桥高速绿地, Green Space along S2 Expressway; JCP:嘉北郊野公园, Jiabei Country Park; KWP:昆秀湖湿地公园, Kunxiuhu Wetland Park; PCP:浦江郊野公园, Pujiang Country Park; SNP:佘山, Sheshan National Forest Park; SQP:双桥公园, Shuangqiao Park; WJP:吴泾公园, Wujing Park; WWP:吴淞炮台湾湿地森林公园, Wusong Wetland Forest Park

依据降温幅度在<2℃、2—2.51℃和>2.51℃的分布,将绿地斑块降温效应划分为低、中、高三类,其面积中位数分别为 4.28 hm²、32.67 hm²和 192.23 hm²,且绿地面积的对数与降温幅度呈正相关($P<0.05$),相关系数为 0.56。其中,复兴公园(FXP)面积超过 8.89 hm²,日均降温幅度为 3.10℃;虽然海湾国家森林公园面积最大,日均降温幅度为 2.37℃,说明有其他因素共同影响公园降温效应。

3.2 降温时间变化

图3为观测样地中心与对照点温差的日间变化趋势,其中6个样地观测期内出现降雨事件。整体上来看,观测样地上午(8:00—11:00)、中午(11:00—14:00)、下午(14:00—18:00)的平均降温幅度分别为 3.13°C 、 2.56°C 和 2.27°C ,除滴水湖公园(DSP)和吴淞炮台湾湿地森林公园(WWP)以外,其余样地上午降温幅度高于其他时间段,其中奉浦四季生态园(FEP)和海湾国家森林公园(BNP)下午降温幅度略高于中午。滴水湖公园(DSP)下午降温幅度最高,为 7.3°C ,吴淞炮台湾湿地森林公园(WWP)降温幅度在中午达到最大值。

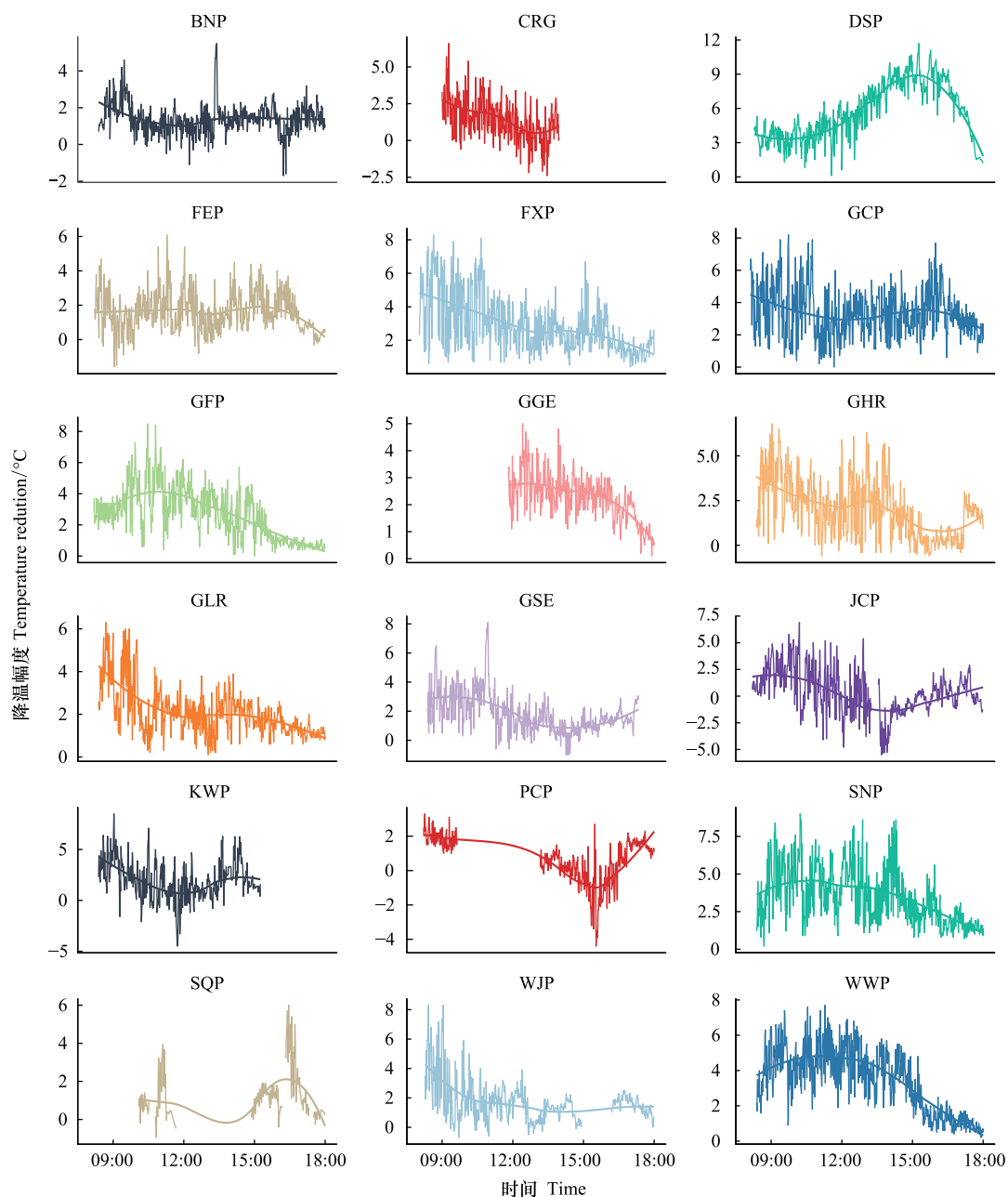


图3 绿地中心日降温幅度变化趋势

Fig.3 Temperature changes in the observation and reference sites

此外,一天中局部下雨会影响绿地的热岛效应,其中嘉北郊野公园(JCP)于13:00—16:00左右持续降雨,浦江郊野公园(PCP)在14:30—16:30出现小雨,昆秀湖湿地公园(KWP)和双桥公园(SQP)也在下午出

现降雨。在这些时间段内对照点与观测点的气温差值为负,在其他晴朗的时间段内,气温差值为正(图 3),这说明在雨天中绿地降温效应不明显,在晴朗无云的天气下,公园与其周围环境之间的温度差异更明显。

3.3 环境温度影响

城市绿地调节小气候功能主要与植被蒸腾和冠层遮阴两个过程有关^[38-39],一般情况下,外界环境温度越高时植物蒸腾作用越强烈。由于城市绿地降温幅度代表观测样地与对照点的温度之差,因此易受外界环境温度的影响。本研究中 18 个观测实验中环境温度变化在 30—37℃ 之间,且城市绿地降温幅度随着外界环境温度的升高而增加,二者呈现出中等相关趋势(图 4),相关系数为 0.47 ($P<0.05$)。为此,采用回归方程($y = -8.17+0.32x$)推断,当外界环境温度为 26℃ 时,城市绿地降温幅度将不明显。

3.4 覆被格局影响

表 3 是观测样地降温率和覆被格局因子特征统计,结果表明上海城市绿地降温率变化在 2.92%—16% 之间,平均降温率达到 7%。在覆被格局因子中,城市绿地的斑块面积、水面比例、不透水面比例以及对照点的硬化地面比例等指标均存在较大差异。对格局因子与绿地降温率线性回归发现,绿地斑块面积、LAI、乔木密度、水面比例、不透水面比例和对照点硬化地面比例与绿地降温率均有较强的线性关系,而灌木盖度、草坪盖度以及交通用地比例与降温率的相关关系不显著(图 5)。其中,城市绿地内乔木密度与其降温率的相关性最显著,其次为绿地斑块面积、叶面积指数以及水面比例,而不透水面比例对城市绿地降温效应表现出消极影响。因此,改变城市绿地内乔木栽植数量、斑块面积、叶面积指数、水体面积以及不透水水面的配置可有效调控夏季绿地降温效应。

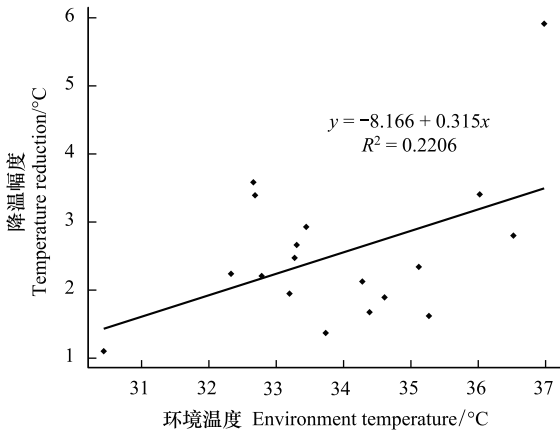


图 4 环境温度与绿地降温幅度的关系
Fig.4 Correlated relationship of environment temperature and cooling effect in the 18 observed sites

表 3 绿地降温率及观测点与对照点地表覆被特征

Table 3 Values of the landscape parameters in the 18 monitored urban green spaces

样地 Sites	降温率 Cooling rate/%	观测点 Observation site						对照点 Reference site	
		叶面积指数 LAI	灌木盖度 Shrub cover/%	草坪盖度 Turf cover/%	水面比例 Water cover/%	不透水面比 Impervious land cover/%	乔木密度 Tree density/ (株/m ²)	硬化地 面比例 Pavement cover/%	交通用 地比例 Road cover/%
SQP	4.54	1.36	16.84	38.67	0.00	16.07	0.037	40.88	25.32
GGE	6.93	2.31	11.97	19.00	0.00	5.81	0.083	37.84	30.39
GCP	9.46	2.23	35.00	29.00	5.43	0.36	0.085	100.00	0.00
JCP	2.92	1.32	20.00	22.00	0.00	55.23	0.070	22.55	0.00
CRG	3.86	1.84	20.67	10.00	10.06	18.60	0.058	55.00	47.85
PCP	3.61	1.54	29.90	40.23	22.68	3.05	0.070	34.64	0.00
WJP	4.89	2.51	8.15	45.50	12.58	6.69	0.065	29.35	21.01
DSP	15.99	2.97	0.00	44.80	64.08	6.95	0.148	68.55	53.58
GSE	5.87	1.51	29.33	4.20	10.30	21.90	0.070	38.55	33.55
BNP	5.42	3.08	1.48	28.50	0.00	19.65	0.098	42.48	0.00
GHR	6.67	2.01	0.00	4.20	1.56	0.00	0.153	64.95	64.95
FEP	4.60	1.86	35.33	34.10	21.37	14.88	0.043	34.50	33.50
KWP	6.20	1.17	5.56	12.50	34.45	13.45	0.023	84.43	33.10
GFP	8.00	1.25	6.67	56.43	0.00	14.17	0.060	63.91	47.90
SNP	10.97	3.87	28.78	27.00	5.82	7.08	0.080	80.36	8.65
FXP	8.76	3.56	61.67	17.78	0.00	10.90	0.060	80.32	43.39
GLR	6.73	2.35	54.33	40.00	0.00	10.35	0.050	62.31	38.56
WWP	10.38	2.14	58.33	21.10	33.89	0.00	0.128	68.53	26.07

LAI: Leaf area index

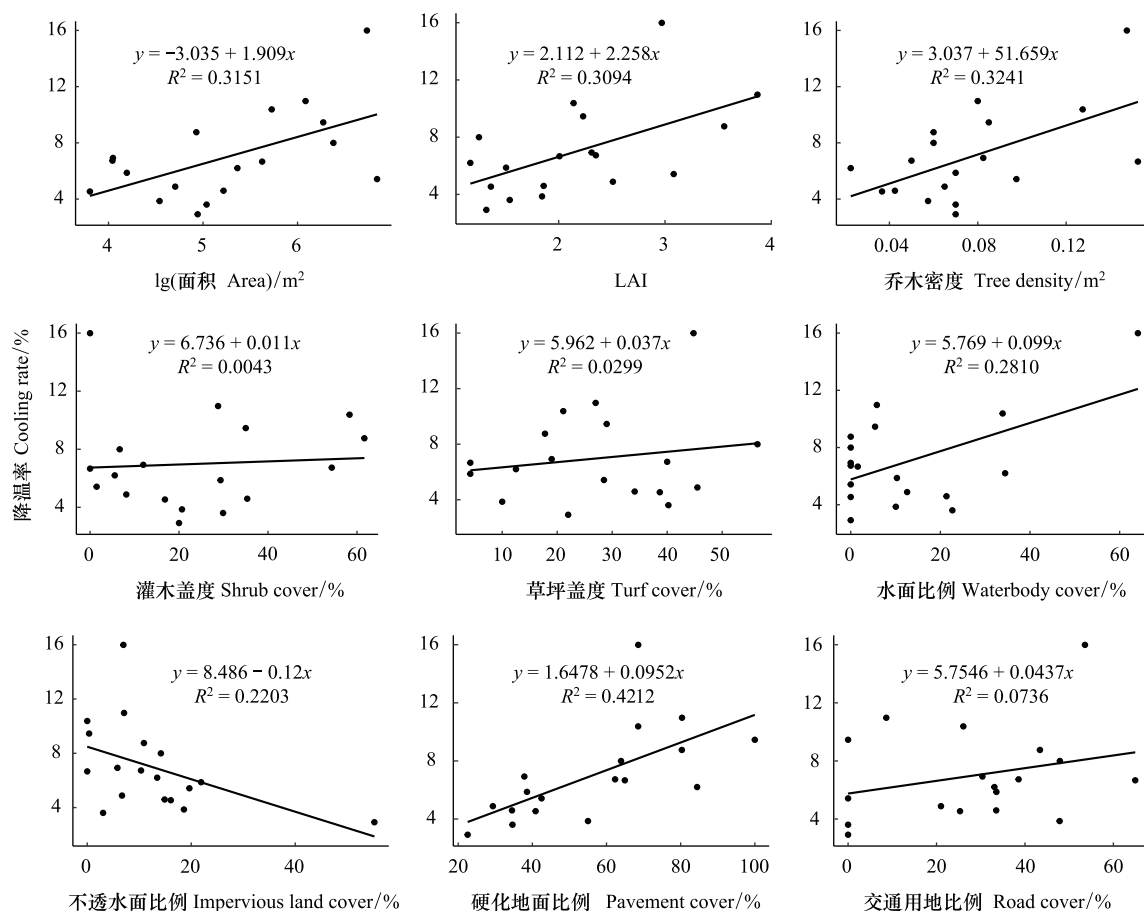


图5 城市绿地日均降温率与覆被格局因子的相关性

Fig.5 Correlated relationship of average daily cooling rate and landscape pattern parameters

LAI:叶面积指数, Leaf area index

为降低不同覆被格局因子之间的内部相关性,开展绿地内部7个覆被格局因子的 Pearson 相关分析,结果发现(图6),叶面积指数、乔木密度、草坪密度和水面比例均与绿地斑块面积相关,其中 LAI、乔木密度和水面比例与绿地面积呈较强的正相关,而灌木盖度与绿地面积负相关,原因可能在于观测样地群落结构以乔草为主;乔木密度和灌木盖度均与叶面积指数正相关,绿地内不透水面比例与叶面积指数为负相关,其中乔木密度的相关性最强;而水面比例与乔木密度也表现出较强相关性,原因可能是水体较多的绿地斑块更适宜乔木生长;叶面积指数与乔木密度和不透水面比例负相关性较强,因为在缓冲区面积内,不透水面比例的增加意味着植被覆盖面积的减少。整体来看,乔木密度和面积有着较强相关性,相关系数为 0.52 ($P < 0.05$),优化乔木种植方式、提高乔木植株密度有助于提升绿地降温效应。

基于以上覆被格局因子分析,在 R-studio 中对变量进行多元回归分析,选取影响绿地降温效应并具有统计意义的关键因子,包括乔木密度、叶面积指数、水面比例,以及硬化地面比例。分别以乔木密度和叶面积指数为主变量构建回归模型。当绿地面积和叶面积指数不变时,乔木密度、水面比例和硬化地面比例的多元回归模型为 $y = -0.77 + 34.64 \times \text{乔木密度} + 0.06 \times \text{水面比例} + 0.08 \times \text{硬化地面比例}$ ($R^2 = 0.73$, $F = 12.65$, $P < 0.001$),即其他因子不变时观测样方内乔木密度增加 5%,城市绿地降温率上升 1.73%,同样绿地内水面比例如果增加 20%,上海城市绿地降温率可上升 1.18%。当绿地斑块面积和乔木密度不变时,叶面积指数、水面比例和硬化地面比例的多元回归模型中为 $y = -1.19 + 1.66 \times \text{LAI} + 0.08 \times \text{水面比例} + 0.06 \times \text{硬化地面比例}$ ($R^2 = 0.75$, $F = 13.86$, $P < 0.001$)。说明在其他参数相同的条件下,绿地 LAI 的增加 1 将使白天降温率上升 1.66%,水面比例

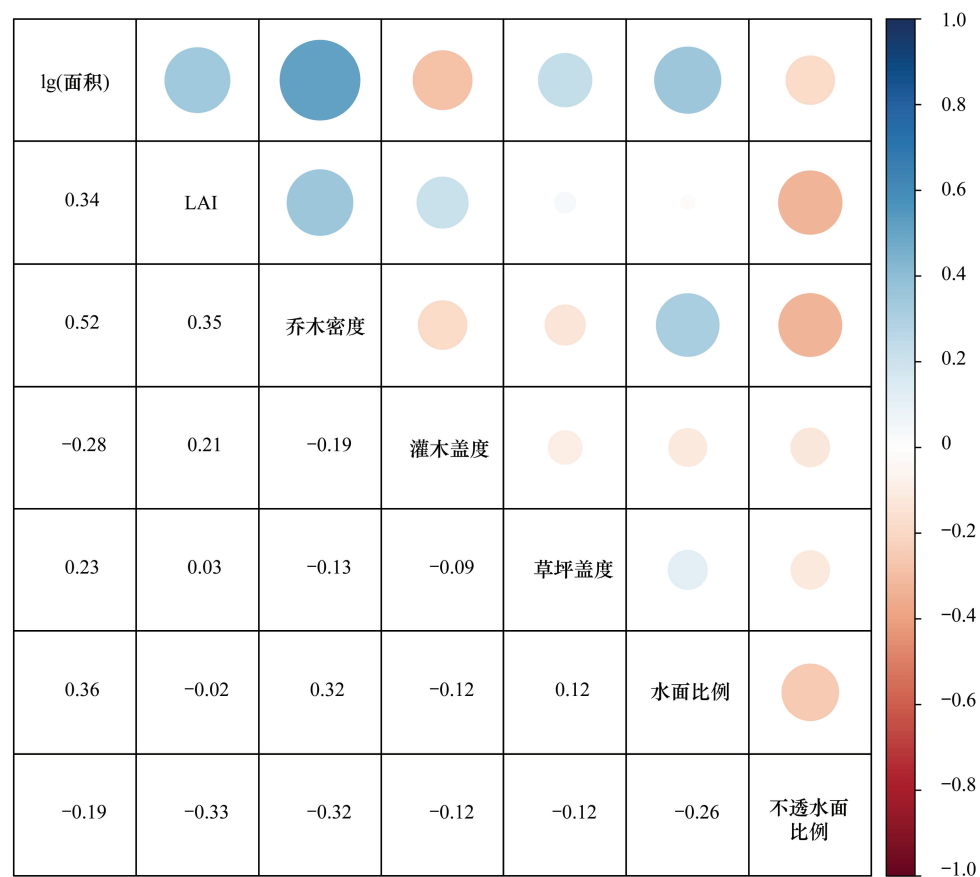


图 6 绿地覆被格局因子的 Pearson 相关矩阵图

Fig.6 Pearson's correlation matrix of the seven landscape parameters

增加 20%分别使白天降温率上升 1.68%。同时,以上回归模型总体在标准误差范围内(表 4)。

表 4 降温率与景观格局参数的多元线性回归分析

Table 4 Multiple linear regression of daytime mean cooling rate and landscape parameters

响应变量 Responsive variable	参数 Parameter	估计值 Estimate	标准误差 Standard error	<i>t</i>	<i>P</i>	95%置信区间 95% Confidence interval	
						下限 Lower	上限 Upper
T_p	截距	-0.767	1.458	-0.526	0.170	-3.894	2.361
	乔木密度	34.644	13.370	2.591	$P<0.05$	5.968	63.319
	水面比例	0.059	0.027	2.145	$P<0.05$	9.3×10^{-6}	0.118
	硬化地面比例	0.078	0.021	3.750	$P<0.01$	0.033	0.123
T_p	截距	-1.193	1.467	-0.813	0.928	-4.340	1.953
	LAI	1.655	0.579	2.857	$P<0.05$	0.413	2.898
	水面比例	0.084	0.025	3.321	$P<0.01$	0.030	0.138
	硬化地面比例	0.064	0.021	2.990	$P<0.01$	0.018	0.109

T_p : 日均降温率, Average daily cooling rate

4 讨论与结论

4.1 讨论

近年来上海市高温热浪事件与城市热岛问题突出^[40-41],揭示量化城市绿地改善小气候的作用规律对城

市人居环境质量提升与生态空间建设管理有着重要指导价值。由于不同地区气候要素和绿地特征差异以及观测研究方法的不同,城市绿地调节小气候作用存在较大差异^[32, 42]。本文基于绿地样本观测数据和高分辨率 Google Earth 影像,分析了上海市绿地降温效应及覆被格局影响因子。结果表明,上海城市绿地夏季日均降温 1.17—5.60℃,但近三分之二观测样地降温幅度低于平均值(2.51℃)。高凯等^[27]实地测量了上海市居住区内 130 个绿地斑块的气象要素,发现夏季绿地中心降温幅度平均值在 2.6℃左右。Du 等^[26]利用遥感数据,揭示上海中心城区 68 个绿地斑块降温幅度为 0.78—5.20℃。该研究结果与前人研究结论基本一致。

该研究发现,整体上来看上海城市绿地上午时段降温效应最大,下午降温效应最小,这可能与林冠遮荫与蒸腾降温的共同作用有关。比如,王晓娟等^[43]研究指出,白天遮荫对降温贡献率明显高于蒸腾降温,而遮荫降温效应又与太阳辐射日变化规律基本一致。即绿地遮荫降温效应在 6:00 左右启动,之后随着太阳辐射的增强而不断增大,下午(日落前 3—4 h)遮荫降温效应则随着太阳辐射的减弱而持续下降。而在正午时刻,太阳天顶角变小,加上不同树种的树叶排列方式、冠层浓密程度等差异,可能会造成正午遮荫降温效应的剧烈变化^[43]。本次观测时间开始于每日的 8:00—9:00,上午时段(8:00—11:00)的冠层遮荫降温幅度高于下午(14:00—18:00)遮荫降温幅度,而中午(11:00—14:00)在强烈太阳照射下,植物叶片气孔电导减小甚至气孔关闭,叶片蒸腾速率降低,可能降低蒸腾降温效应^[44]。此外,绿地降温作用随绿地内外环境因素变化以及植物特定的热和光学特征而存在差异^[33]。比如滴水湖公园(DSP)在下午 15 时左右降温效应最大,主要由于对照点此时的环境温度最高所致。但在某些时刻,一些绿地如海湾国家森林公园(BNP)、昆秀湖湿地公园(KWP)和双桥公园(SQP)出现热岛现象。Chang 等^[16]指出绿地内部大面积的不透水面会吸收并反射太阳光,导致绿地内部温度升高,出现“公园热岛”现象。Xiao 等^[45]指出面积大的绿地的降温效应稳定,小的绿地的降温效应波动大,在某些情况下甚至保温。

此外,城市气温易受建筑高度、区域气候以及地表覆被格局等多种因素影响^[46]。该研究证实绿地内叶面积指数、乔木植株密度、水面比例、绿地面积和对照点硬化地面比例均与绿地降温率有显著正相关关系,绿地内不透水面比例与降温率有显著负相关关系,其中乔木密度、水面比例和硬化地面比例对绿地降温率的解释率达到 73%,而 LAI、水面比例和硬化地面比例对绿地降温效应的解释率也达 75%。原因主要是城市绿地中以乔木为主的植被群落由于冠层遮荫和蒸散降温的共同作用^[47],因而表现为白天绿地内乔木覆盖率对降温作用的积极影响^[33-34]。本文中表示绿地内乔木覆盖特征的指标为叶面积指数和乔木植株密度。同时灌木盖度和草坪盖度与降温率的相关性不显著,Chang 等^[16]也指出白天草坪的降温作用没有树木显著,甚至不明显。但 Cao 等^[15]认为夏季白天灌木对公园降温效应的影响与树木几乎等同。这与本研究观测样地中灌木盖度较小有关。也有研究指出绿地面积与降温幅度是非线性正相关^[35, 48]。一般绿地面积越小,与周围街道和建筑物的距离更近,二者之间的显热和潜热传播更频繁,加上小公园的绿化面积有限,公园内部不透水面比例更大,地面反照率更高,使得小面积绿地更易受到外界热环境的影响。城市绿地内的水体通过蒸发对周围环境有潜在降温作用^[17, 20],不过水体降温作用可能小于绿地^[9, 45]。Cao 等^[15]通过高分辨率遥感数据证实当公园内水面比例太小时水体冷却效果不明显。此外,不透水面具有较高的反射率,其面积的增加不仅意味着绿地内植被和水体比例的减少,而且吸收大量热量而减弱了绿地降温效应。

不过该研究中绿地降温率回归模型仅基于 18 个观测样地结果,样本数量较少影响定量评估区域绿地夏季降温功能的准确性,未来研究需要增加更多样地观测结果验证。同时,该研究仅考虑了距离观测样地中心 10—200 m 周边的覆被格局因子,可能在某个范围内覆被格局因子存在更明显的影响。如 Petrali 等^[49]研究比较了 9 个不同缓冲区大小(半径:10—500 m)与景观格局指标的线性回归模型的回归系数,发现以夏季白天最低气温为自变量时,回归系数和显著性随着距离增加而增加,以夏季白天最高气温为自变量时,回归系数和显著性在 50 m 缓冲区内达到最大。

4.2 结论

本研究基于 18 个典型绿地样地,实测了其夏季降温功能及其差异,分析了绿地周围覆被格局对降温效应

的影响。结果发现上海市绿地气温明显比周围建设用地的气温低,降温幅度范围为 1.17—5.60℃,均降温幅度为 2.51℃;绿地降温效应与环境温度、观测点乔木叶面积指数、绿地斑块面积、植株密度、水面比例、不透水面比例和对照点硬化地面比例有显著正相关关系,预测外界环境温度低于 26℃时,城市绿地降温作用不明显;考虑到半径在 10—200 m 之间的缓冲区,绿地内植被密度增加 5%、叶面积指数增加 1 或者水面比例上升 20%可分别使绿地降温率上升 1.73%、1.66%和 1.18%,因此改变城市绿地内乔木栽植数量、绿地斑块面积、叶面积指数、不透水面比例以及水体配置可有效调控上海夏季绿地降温效应。

参考文献 (References):

- [1] Tan J G, Zheng Y F, Tang X, Guo C Y, Li L P, Song G X, Zhen X R, Yuan D, Kalkstein A J, Li F R, Chen H. The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. *International Journal of Biometeorology*, 2010, 54(1): 75-84.
- [2] Wang Y Y, Du H Y, Xu Y Q, Lu D B, Wang X Y, Guo Z Y. Temporal and spatial variation relationship and influence factors on surface urban heat island and ozone pollution in the Yangtze River Delta, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 631-632: 921-933.
- [3] Fu D F, Bu B, Wu J G, Singh R P. Investigation on the carbon sequestration capacity of vegetation along a heavy traffic load expressway. *Journal of Environmental Management*, 2019, 241: 549-557.
- [4] 薛雪, 张金池, 孙永涛, 庄家尧, 王鹰翔. 上海常绿树种固碳释氧和降温增湿效益研究. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2016, 40(3): 81-86.
- [5] Nowak D J, Hirabayashi S, Doyle M, McGovern M, Pasher J. Air pollution removal by urban forests in Canada and its effect on air quality and human health. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 29: 40-48.
- [6] 肖玉, 王硕, 李娜, 谢高地, 鲁春霞, 张彪, 张昌顺. 北京城市绿地对大气 PM_{2.5} 的削减作用. *资源科学*, 2015, 37(6): 1149-1155.
- [7] Xiao Q F, McPherson E G. Surface water storage capacity of twenty tree species in Davis, California. *Journal of Environment Quality*, 2016, 45(1): 188-198.
- [8] 张彪, 王硕, 李娜. 北京市六环内绿色空间滞蓄雨水径流功能的变化评估. *自然资源学报*, 2015, 30(9): 1461-1471.
- [9] Amani-Beni M, Zhang B, Xie G D, Xu J. Impact of urban park's tree, grass and waterbody on microclimate in hot summer days: a case study of Olympic Park in Beijing, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 32: 1-6.
- [10] 钮子鹏, 章皖秋, 岳彩荣. 昆明市绿地斑块特征对地表降温的影响. *西南林业大学学报*, 2018, 38(6): 151-158.
- [11] Alcazar S S, Olivieri F, Neila J. Green roofs: experimental and analytical study of its potential for urban microclimate regulation in Mediterranean-continental climates. *Urban Climate*, 2016, 17: 304-317.
- [12] Ávila-Hernández A, Simú E, Xamún J, Hernández-Pérez I, Téllez-Velázquez E, Chagolla-Aranda M A. Test box experiment and simulations of a green-roof: thermal and energy performance of a residential building standard for Mexico. *Energy and Buildings*, 2020, 209: 109709.
- [13] Klemm W, Heusinkveld B G, Lenzholzer S, van Hove B. Street greenery and its physical and psychological impact on thermal comfort. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 138: 87-98.
- [14] Yang Y J, Zhou D, Gao W J, Zhang Z H, Chen W, Peng W C Y. Simulation on the impacts of the street tree pattern on built summer thermal comfort in cold region of China. *Sustainable Cities and Society*, 2018, 37: 563-580.
- [15] Cao X, Onishi A, Chen J, Imura H. Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 96(4): 224-231.
- [16] Chang C R, Li M H, Chang S D. A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 80(4): 386-395.
- [17] Du H Y, Song X J, Jiang H, Kan Z H, Wang Z B, Cai Y L. Research on the cooling island effects of water body: a case study of Shanghai, China. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 31-38.
- [18] Wang Y S, Zhan Q M, Ouyang W L. How to quantify the relationship between spatial distribution of urban waterbodies and land surface temperature? *Science of the Total Environment*, 2019, 671: 1-9.
- [19] 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. *Building and Environment*, 2011, 46(11): 2186-2194.
- [20] Hathway E A, Sharples S. The interaction of rivers and urban form in mitigating the Urban Heat Island effect: a UK case study. *Building and Environment*, 2012, 58: 14-22.
- [21] Bowler D E, Buyung-Ali L, Knight T M, Pullin A S. Urban greening to cool towns and cities: a systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 97(3): 147-155.

- [22] 苏泳娴, 黄光庆, 陈修治, 陈水森, 李智山. 城市绿地的生态环境效应研究进展. 生态学报, 2011, 31(23): 7287-7300.
- [23] 陈爱莲, 孙然好, 陈利顶. 基于景观格局的城市热岛研究进展. 生态学报, 2012, 32(14): 4553-4565.
- [24] 孔繁花, 尹海伟, 刘金勇, 闫伟姣, 孙常峰. 城市绿地降温效应研究进展与展望. 自然资源学报, 2013, 28(1): 171-181.
- [25] Tran H, Uchihama D, Ochi S, Yasuoka Y. Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2006, 8(1): 34-48.
- [26] Du H Y, Cai W B, Xu Y Q, Wang Z B, Wang Y Y, Cai Y L. Quantifying the cool island effects of urban green spaces using remote sensing Data. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 27: 24-31.
- [27] 高凯, 秦俊, 宋坤, 胡永红. 城市居住区绿地斑块的降温效应及影响因素分析. 植物资源与环境学报, 2009, 18(3): 50-55.
- [28] 张明丽, 秦俊, 胡永红. 上海市植物群落降温增湿效果的研究. 北京林业大学学报, 2008, 30(2): 39-43.
- [29] 秦俊, 王丽勉, 胡永红, 张明丽, 由文辉. 上海居住区植物群落的降温增湿效应. 生态与农村环境学报, 2009, 25(1): 92-95.
- [30] 郭帅新, 林久人. 上海市城市空间功能结构研究综述. 南都学坛, 2018, 38(6): 113-124.
- [31] 上海市统计局. 2018 年上海统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [32] 栾博, 柴民伟, 王鑫. 绿色基础设施研究进展. 生态学报, 2017, 37(15): 5246-5261.
- [33] Feyisa G L, Dons K, Meilby H. Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect; an example from Addis Ababa. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 123: 87-95.
- [34] 高吉喜, 宋婷, 张彪, 韩永伟, 高馨婷, 冯朝阳. 北京城市绿地群落结构对降温增湿功能的影响. 资源科学, 2016, 38(6): 1028-1038.
- [35] Cheung P K, Jim C Y. Differential cooling effects of landscape parameters in humid-subtropical urban parks. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 192: 103651.
- [36] Konarska J, Holmer B, Lindberg F, Thorsson S. Influence of vegetation and building geometry on the spatial variations of air temperature and cooling rates in a high-latitude city. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(5): 2379-2395.
- [37] 阮俊杰. 城市公园对夏季热环境的影响——以上海市中心城区为例. 生态环境学报, 2016, 25(10): 1663-1670.
- [38] 张彪, Amani-Beni M, 史芸婷, 谢高地. 北京奥林匹克公园夏季绿地小气候及人体环境舒适度效应分析. 生态科学, 2018, 37(5): 77-86.
- [39] Spronken-Smith R A, Oke T R. The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(11): 2085-2104.
- [40] 陈敏, 耿福海, 马雷鸣, 周伟东, 施红, 马井会. 近 138 年上海地区高温热浪事件分析. 高原气象, 2013, 32(2): 597-607.
- [41] 徐伟, 杨涵涓, 张仕鹏, 茅懋, 陈琛, 梁萍, 夏立. 上海城市热岛的变化特征. 热带气象学报, 2018, 34(2): 228-238.
- [42] Luan Q Z, Ye C H, Liu Y H, Li S Y. Study of effect of urban green land on thermal environment of surrounding buildings; a case study in Beijing, China//*Proceedings of the 14th International Conference on Computational Science and Its Applications*. Guimarães, Portugal: Springer International Publishing, 2014: 299-314.
- [43] 王晓娟, 孔繁花, 尹海伟, 徐海龙, 李俊生, 蒲英霞. 高温天气植被蒸腾与遮荫降温效应的变化特征. 生态学报, 2018, 38(12): 4234-4244.
- [44] Lu J, Li C D, Yang Y C, Zhang X H, Jin M. Quantitative evaluation of urban park cool island factors in mountain city. *Journal of Central South University*, 2012, 19(6): 1657-1662.
- [45] Xiao X D, Dong L, Yan H N, Yang N, Xiong Y M. The influence of the spatial characteristics of urban green space on the urban heat island effect in Suzhou Industrial Park. *Sustainable Cities and Society*, 2018, 40: 428-439.
- [46] Oke T R. Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites. *Instruments and Observing Methods Report No.81*. Geneva: World Meteorological Organization, 2006.
- [47] Giridharan R, Lau S S Y, Ganesan S, Givoni B. Lowering the outdoor temperature in high-rise high-density residential developments of coastal Hong Kong: the vegetation influence. *Building and Environment*, 2008, 43(10): 1583-1595.
- [48] Chibuike E M, Ibukun A O, Abbas A, Kunda J J. Assessment of green parks cooling effect on Abuja urban microclimate using geospatial techniques. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2018, 11: 11-21.
- [49] Petralli M, Massetti L, Brandani G, Orlandini S. Urban planning indicators: useful tools to measure the effect of urbanization and vegetation on summer air temperatures. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(4): 1236-1244.