

# 上海市绿地植被的吸热降温效益评估

张彪<sup>1,2</sup>, 谢紫霞<sup>1,2</sup>, 高吉喜<sup>3</sup>, 余欣璐<sup>4</sup>

(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. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094; 4. 中国人民大学, 北京 100872)

**摘要:** 城市绿地夏季高温时具有明显降温作用。但现有研究侧重降温效应观测及其影响因子解析, 而对绿地降温效益与人居环境需求的空间一致性鲜有研究。以上海市为例, 基于高分卫星影像与样地观测数据, 采用植被蒸腾吸热经验模型评估了城市绿地夏季降温效益, 并利用GIS空间分析技术量化了绿地降温效益与空气温度及人口分布的空间耦合程度。结果表明: 2017年上海城市绿地面积为10.45万 $\text{hm}^2$ , 夏季(6-9月)绿地植被吸热量可达 $8.49 \times 10^{15} \text{ J}$ , 相当于节约夏季空调降温的经济价值为14.57亿元, 其中46%和33%的绿地降温效益来自阔叶林与混交林; 浦东新区、崇明区和奉贤区的绿地植被合计贡献了67%的降温效益, 但虹口、黄浦、徐汇等中心城区绿地的单位面积降温效益较高。更需关注的是, 绿地植被降温效益与人居环境需求表现出局部地区的空间不一致, 其中28.62%的地区植被降温效益与空气温度处于低耦合状态, 7.31%的地区植被降温效益与人口密度为低耦合水平, 且均集中分布在中心城区。因此, 重点提升中心城区绿地植被降温功能, 并规划建设周边绿地降温效益的空间辐射通道, 是上海城市生态空间优化的重要方向。

**关键词:** 城市绿地; 吸热降温; 价值评估; 空间耦合; 上海市

城市热岛是指城市内因热量聚集而产生的一种城区温度高于郊区温度的现象<sup>[1]</sup>, 不仅降低城市居住环境舒适性<sup>[2,3]</sup>、增大居民健康风险<sup>[4,5]</sup>, 而且增加城市能源消耗、温室气体排放以及空气污染<sup>[6,7]</sup>, 是21世纪全球城市普遍面临的重要挑战<sup>[8-10]</sup>。城市绿地是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<sup>[11]</sup>, 绿地植被一方面通过树冠遮挡阳光减少地面吸收的热量, 另一方面通过蒸腾作用吸收周围环境中的热量进而降低空气温度<sup>[12]</sup>, 提高环境舒适度<sup>[13,14]</sup>。因此城市绿地缓解热岛效应的功能与经济潜力引起广泛关注<sup>[15-20]</sup>。

目前已有大量研究借助遥感反演、样地实测以及模型模拟等手段评价城市绿地的降温效果。比如, Imhoff等<sup>[21]</sup>利用Landsat TM和MODIS影像发现, 美国夏季38个城区林地温度比裸地平均低 $8^\circ\text{C}$ , 有植被覆盖地表的温度比裸地低 $4.3^\circ\text{C}$ 。Rahman等<sup>[22]</sup>借助两台气象传输器(WXT520)对比测量发现, 德国慕尼黑(Munich)的城市树木可使冠层半径3.5 m范围内的空气温度降低 $3.5^\circ\text{C}$ 。Li等<sup>[23]</sup>采用天气研究与预报模型(WRF)模拟发现, 新加坡绿地植被夜间可降低近地表空气温度 $1^\circ\text{C}$ 。近年来国内类似研究案例也较多。比如, 栾庆祖等<sup>[24]</sup>选用Landsat TM5遥感影像反演北京中心城区地表温度发现, 面积在 $0.5 \text{ km}^2$ 以上的绿地斑块可使周边100 m范围内的建筑物温度降低 $0.46\sim 0.83^\circ\text{C}$ 。高吉喜等<sup>[11]</sup>基于北京市24个典型绿地群落的观测表明, 城市绿地夏季日降温幅度达 $0.2\sim$

收稿日期: 2019-10-13; 修订日期: 2020-11-06

基金项目: 上海市环保科研项目(沪环科[2018]第2号)

作者简介: 张彪(1980-), 男, 山东郯城人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事生态服务功能与生态补偿研究。E-mail: zhangbiao@igsnrr.ac.cn

2.0 °C。周媛等<sup>[25]</sup>采用CFD仿真模拟法模拟沈阳市夏季气候环境发现，城市绿地的地表气温明显低于建筑物密集的生产生活区。

除城市绿地降温效果研究外，绿地降温效应的影响因素也受到广泛关注。比如，Hamada等<sup>[26]</sup>发现，日本名古屋（Nagoya）城区绿地的夏季降温效果优于冬季。苏泳娴等<sup>[27]</sup>借助TM遥感影像分析，认为公园绿地的面积、长宽比以及公园内水体面积均可影响到其降温效果。而朱春阳等<sup>[28]</sup>通过样地对比观测发现，带状绿地的宽度与其降温效益的关系密切。Kong等<sup>[29]</sup>在南京中山植物园的观测研究证实，小叶片树木的降温效果优于大叶片的树木。Amani-Beni等<sup>[30]</sup>观测表明，北京奥林匹克公园绿地内的植物群落结构以及灌溉水平对其降温功能均有显著影响。此外，城市形态<sup>[31,32]</sup>和气候因子<sup>[33,34]</sup>也是影响绿地降温效果的重要因素。

不过，以往研究注重城市绿地降温效应测定和影响因素分析，且较多样地尺度的观测评估，对城市尺度绿地空间格局优化的指导作用有限。考虑到城市内人口分布、绿地布局以及环境气温的空间异质性，绿地降温效益与人居环境需求可能存在一定程度上的空间错位，如何实现绿地降温效益与人居环境需求的空间耦合是优化城市绿地空间布局的关键<sup>[1,35]</sup>。为此，本文以上海市为例，基于高分卫星影像与样地观测数据，定量评估了城市绿地植被的夏季降温效益，重点识别分析了降温效益与空气温度及人口密度的空间耦合情况，可为上海城市绿地的规划建设以及优化管理提供参考依据。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 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（图1）。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 °C，日照时间1809.2小时，降水量达1388.8 mm，降雨日达124天。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。近年来上海城市绿化建设加速，2017年森林覆盖率达到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 m<sup>2</sup>/人<sup>[36]</sup>。

上海是我国城市化程度最高的城市之一，2017年上海市行政区总面积为6340.50 km<sup>2</sup>，其中建设用地总面积为3088 km<sup>2</sup>，建成区面积近20年



图1 研究区地域组成

Fig. 1 Administrative divisions of Shanghai

增加约35%<sup>[37]</sup>。2017年末上海市常住人口有2418.33万人，人口密度达到3814人/km<sup>2</sup>，其中黄浦区、虹口区、杨浦区、普陀区等人口密度均超2万人/km<sup>2</sup><sup>[36]</sup>。近年来受全球气候变化和快速城市化影响，气温显著上升，气候趋于干旱化<sup>[38,39]</sup>，高温热浪事件增加<sup>[40]</sup>，城市热岛问题日益突出<sup>[41]</sup>。

1.2 城市绿地植被获取

绿地植被是城市中重要绿色基础设施<sup>[42]</sup>，主要由乔木林、灌木林和草地等组成。基于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景影像数据，利用ENVI软件完成正射校正、辐射定标、图像融合和大气校正等预处理，生成配准后高分影像（2 m分辨率）；然后以上海市行政边界为范围，采用人工目视解译方法，按照地理国情监测内容与指标的数据分类（GQJC03-2017），结合上海市森林资源调查数据，将绿地植被分为阔叶林、针叶林、混交林、竹林、灌木和草地（图2），完成分幅矢量化的单元网格解译。通过22个调查样地进行验证，植被类型解译准确率达到89%，满足本文需要。

1.3 吸热降温效益估算

城市绿地的降温效益评估方法主要有样地观测、遥感反演和数值模拟等<sup>[22,25,43,44]</sup>。本文重点在于量化绿地植被蒸腾作用对环境温度的影响，因此采用城市绿地降温幅度与吸热量换算的经验模型<sup>[16]</sup>，即以底面积为10 m、高度100 m的空气柱体为计算单元，将空气温度的下降幅度转化为绿地植被需从周边环境蒸腾吸收的热量（ $\Delta Q$ ）。其中，城市绿地降温幅度（ $\Delta T_i$ ）来自于上海城市绿地降温效应的样地观测研究<sup>[45-50]</sup>。由于实地降温观测多集中在白天8:00-17:00，受太阳辐射日变化的影响，城市绿地不同时段的遮荫降温效应有一定差异，为降低观测样地和观测时段差异所带来的不确定性，利用SPSS软件进行样点观测结果的统计分析并采用日均值（表1），同时考虑到城市绿地降温效应在环境气温较高日期最为显著<sup>[28]</sup>，因此以上海市夏季高温期（6-9月）作为评估时段<sup>[51]</sup>，夏季绿地植被降温吸热量（ $THQ$ ）的计算公式为：

$$\Delta Q_i = \Delta T_i \times p_c \times 24$$

(1)

$$THQ = \sum_{i=1}^n 120 \times \Delta Q_i \times A_i$$

(2)



图2 上海市绿地植被分布  
Fig. 2 Distribution of green spaces in Shanghai



表1 基于样地观测的上海城市绿地夏季降温幅度  
Table 1 Temperature reductions of different green spaces  
types from site observations in Shanghai

绿地类型	降温幅度/℃			样本数/个
	最大值	平均值	最小值	
针叶林	4.30	2.64	1.60	10
阔叶林	4.00	2.44	1.22	10
混交林	4.50	2.91	1.40	9
竹林	3.90	2.86	1.60	5
灌木林	3.60	2.40	1.10	5
草地	2.30	1.21	0.14	6

式中： $THQ$ 为绿地植被夏季降温吸热总量（J）； $\Delta Q_i$ 为第*i*类绿地日降温吸热量 [ $10^8 \text{ J}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ ]； $p_c$ 为空气的容积热容量 [ $1256 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ]； $\Delta T_i$ 为第*i*类绿地日降温幅度（ $^\circ\text{C}$ ）； $A_i$ 为第*i*类绿地面积（ $\text{hm}^2$ ）；*i*为绿地类型（包括阔叶林、针叶林、混交林、灌木林、竹林和草地）； $n=6$ 。

为提高人居环境舒适度，夏季高温时多采用空调制冷降低空气温度。如果能充分利用城市绿地的吸热降温

功效，则可节约空调电能并减少 $\text{CO}_2$ 排放<sup>[12,20]</sup>，因此城市绿地夏季降温功能具备经济价值属性，可参照上海市居民用电价格，估算绿地植被夏季降温的经济价值<sup>[16]</sup>，计算公式为：

$$V=0.278 \times 10^{-6} \times THQ \times p \tag{3}$$

式中： $V$ 为上海市夏季绿地植被降温价值（元/年）； $p$ 为居民用电价格 [ $0.617 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ]。

1.4 降温效益空间分布

受城市绿地空间分布的影响，绿地植被降温效益存在明显的空间差异<sup>[52,53]</sup>。同时，城市人口和热岛问题也并非均匀分布，热岛强度越大、人口密度越高的地区，对绿地植被降温效益的需求程度越高<sup>[1]</sup>。因此，城市绿地植被的降温效益不仅包括绿地植被吸热降温的价值，也包含降温效益与环境温度或人口分布的空间一致性。为揭示上海绿地植被降温效益与人居环境需求的空间耦合程度，采用2017年3月12日至3月24日（10个工作日和3个非工作日）上海市夜间（0:00-5:00）的手机信号数据确定人口密度分布空间<sup>[54]</sup>，并结合上海市街道边界插值得到常住人口的空间分布图；空气温度采用上海地区11个气象站2017年的日气温资料<sup>[55]</sup>，插值得到夏季（6-9月）气温空间分布。首先分别将上海市绿地降温效益、空气温度以及人口密度分级并排序（表2），然后在ArcGIS的空间分析模块下，逐个比较栅格单元的绿地降温效益（ $PV$ ）的排序值（ $A_i$ ）与环境温度（ $ET$ ）或人口密度（ $PD$ ）的排序值（ $B_i$ ）的大小，以衡量降温效益与空气温度或人口密度耦合程度（ $HL$ ），计算公式表示为：

$$HL=|A_i-B_i|=\begin{cases} 0, & \text{高耦合} \\ 1\sim 2, & \text{中耦合} \\ 3\sim 4, & \text{低耦合} \end{cases} \tag{4}$$

式中： $i$ 为城市绿地斑块。

表2 上海市绿地植被降温效益、空气温度与人口密度分级

Table 2 Grades of population density, air temperature and cooling effects of green spaces in Shanghai

降温效益 $PV/[\text{元}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})]$	空气温度 $ET/^\circ\text{C}$	人口密度 $PD/(\text{人}/\text{km}^2)$	排序值
$PV < 6$	$ET < 26.5$	$PD < 1000$	1
$6 < PV \leq 87$	$26.5 < ET \leq 27.0$	$1000 < PD \leq 4000$	2
$87 < PV \leq 180$	$27.0 < ET \leq 27.5$	$4000 < PD \leq 10000$	3
$180 < PV \leq 880$	$27.5 < ET \leq 28.0$	$10000 < PD \leq 40000$	4
$PV > 880$	$ET > 28.0$	$PD > 40000$	5

## 2 结果分析

研究结果表明, 2017年上海市绿地植被面积为10.45万 $\text{hm}^2$ , 夏季(6-9月份)降温吸热 $8.49 \times 10^{15}$  J, 可节约空调电能23.61亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ , 其经济价值可达14.57亿元, 相当于单位面积绿地日降温效益为139元/ $\text{hm}^2$ 。据统计, 2017年上海市居民每天的电能消费4.18亿 $\text{kW} \cdot \text{h}^{[36]}$ , 如果能充分利用绿地植被的降温效益, 则可每年节约居民生活电力消费的10%, 因此对于上海市人居环境舒适性的提高与生活能源节约具有重要意义。

### 2.1 不同绿地类型的降温效益差异

基于上海市绿地植被组成数据, 阔叶林面积最大(446.93  $\text{km}^2$ ), 其次为草地和混交林, 其面积分别为279.22  $\text{km}^2$ 和265.72  $\text{km}^2$ , 三种植被面积之和占到绿地总面积的95%, 是上海市绿地资源的主体。2017年夏季上海市阔叶林吸热量为 $3.94 \times 10^{15}$  J, 可贡献绿地植被吸热总量的46%, 单位面积日降温效益可达126元/ $\text{hm}^2$ 。其次为混交林, 夏季吸热量可达 $2.79 \times 10^{15}$  J, 约占全市植被降温吸热量的33%, 单位面积日降温价值为150元/ $\text{hm}^2$ 。上海市草地植被夏季的吸热量可达 $1.22 \times 10^{15}$  J, 提供了全市植被降温吸热量的14%, 但单位面积吸热降温量较小, 日降温价值仅有63元/ $\text{hm}^2$ 。虽然针叶林与竹林的夏季吸热量较低, 均不及全市绿地植被吸热总量的3%, 但单位面积日降温效益分别达到137元/ $\text{hm}^2$ 和148元/ $\text{hm}^2$ , 远高于草地植被日降温效益。因灌木林植被面积的限制, 上海市灌木林夏季的吸热量不足降温吸热总量的0.5%, 但可产生124元/ $\text{hm}^2$ 的单位面积日降温价值(图3)。因此, 阔叶林与混交林为上海市绿地植被降温效益的主要供给者, 且乔木林与竹林的单位面积日降温效益较高。

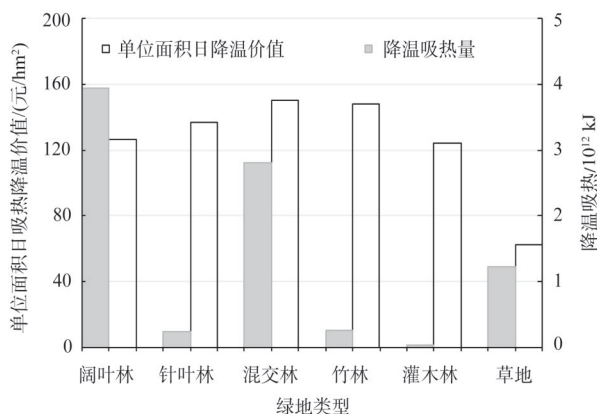


图3 不同绿地类型夏季降温吸热量及价值

Fig. 3 Values and transpiration heat of different green space types in Shanghai

### 2.2 绿地植被降温效益的地区差异

由于上海市各行政区管辖面积不同, 浦东新区和崇明区的绿地植被面积最大, 分别为2.29万 $\text{km}^2$ 和2.68万 $\text{km}^2$ , 合计为上海市绿地植被面积的1/2, 而虹口区、黄浦区、静安区等中心城区的绿地植被面积均不足200  $\text{hm}^2$ 。评估结果表明, 浦东新区绿地夏季吸热量为 $2.88 \times 10^{12}$  J, 约占上海市植被降温吸热总量的33%, 单位面积日降温价值可达181元/ $\text{hm}^2$ 。崇明区和奉贤区绿地的夏季吸热量分别为 $1.73 \times 10^{12}$  J和 $1.23 \times 10^{12}$  J, 分别提供了全市绿地降温吸热量的20%和14%, 其单位面积日降温效益可达106元/ $\text{hm}^2$ 和180元/ $\text{hm}^2$ 。此外, 宝山区、金山区、嘉定区、闵行区、青浦区以及松江区绿地的夏季降温吸热贡献率均在3%~7.5%之间。虽然虹口区绿地的夏季降温吸热量最小( $1.37 \times 10^{10}$  J), 不及全市植被降温吸热量的0.2%, 但单位面积日降温价值可达390元/ $\text{hm}^2$ (图4)。可见, 浦东新区、崇明区和奉贤区为上海市绿地植被降温效益的主要供给者, 但虹口区、黄浦区等中心城区绿地的单位面积降温价值较高。

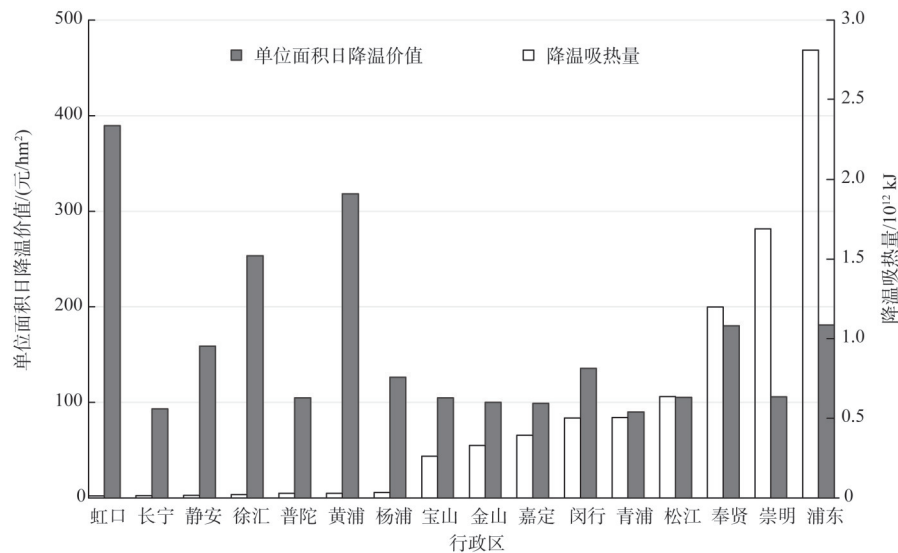


图4 上海市各区绿地植被夏季降温效益  
Fig. 4 Cooling effects of green spaces in various districts of Shanghai

2.3 绿地降温效益与空气温度分布

利用ArcGIS空间分析模块工具，叠加分析上海市夏季空气温度与绿地降温效益的空间耦合情况。结果发现，上海市的绿地植被降温效益与空气温度空间分布存在一定程度的错位（表3）。其中，28.62%的绿地降温效益与空气温度分布处于低耦合状态，主要表现在杨浦区、虹口区、静安区等7个中心城区以及宝山区、嘉定区、松江区、闵行区等周边地区；有27.16%的绿地降温效益与空气温度处于高耦合水平，主要分布在浦东新区的东南部、奉贤区东部以及崇明区东部；44.21%的植被降温效益与空气温度为中耦合状态，在浦东新区的东北部、崇明区中部以及金山区、嘉定区、青浦区等均有明显分布（图5）。整体来看，上海市绿地植被的降温效益与环境温度的降温需求在空间上基本吻合，但中心城区及其毗邻的嘉定、宝山、松江和闵行等地区的绿地植被降温效益尚不满足环境温度的降温需求。

表3 上海市绿地植被夏季降温效益与空气温度及人口密度耦合程度

Table 3 Harmonized levels between the cooling effects of green spaces and air temperature or population density in Shanghai

空气温度耦合分级	面积/km²	占比/%	人口密度耦合分级	面积/km²	占比/%
低耦合	284.9	28.62	低耦合	67.08	7.31
中耦合	440.11	44.21	中耦合	516.42	56.29
高耦合	270.38	27.16	高耦合	333.99	36.40

2.4 绿地降温效益与人口密度分布

基于2017年上海市手机信令时空大数据，获得城市人口密度分布空间，并与绿地植被降温效益进行叠加分析发现，上海市绿地植被降温效益与人口分布有较好的空间一致性（表3）。其中，有36.40%的绿地降温效益与人口密度空间为高耦合状态，主要分布在浦东新区的东部以及松江区、奉贤区和嘉定区；有7.31%的绿地植被降温效益与人口密度处于低耦合状态，集中分布在中心城区以及浦东新区的西北部和奉贤区的东部；另外

有 56.29% 的绿地降温效益与人口分布呈中度耦合分布, 主要分布在青浦区、金山区、崇明区以及浦东新区的东南部等 (图 6)。整体来看, 上海市绿地植被降温效益与人口密度分布的空间一致性较高, 但人口高度集中的中心城区以及浦东新区西北部的绿地降温效益需重点提升。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

本文评估分析了上海市绿地植被夏季吸热降温效益及其空间分布特征。结果发现, 2017 年上海市分布有绿地面积 10.45 万  $\text{hm}^2$ , 阔叶林、混交林和草地的面积比例较大。上海市绿地植被夏季可吸热  $8.49 \times 10^{15}$  J, 可节约当年居民生活用电量的 10%, 其经济价值可达 14.57 亿元, 对上海市人居环境舒适性的提高与生活能源节约具有重要意义。上海市绿地植被的降温效益主要来自于浦东新区、崇明区和奉贤区等郊区的阔叶林与混交林, 但降温效益与人口密度的空间一致性明显优于降温效益和环境温度的空间耦合, 因此未来上海城市绿地建设更需考虑如何结合城市热岛缓解的降温需求进行规划布局。由于上海中心城区的植被降温效益与空气温度、人口密度均存在较低的空间耦合, 通过改造植被群落结构和三维绿量提升中心城区绿地植被降温功能, 并规划建设用以引入周边地区绿地植被降温效益的空间辐射通道将是上海城市生态空间优化的重要内容。

#### 3.2 讨论

近年来上海市高温热浪事件与城市热岛问题突出<sup>[40,41]</sup>, 认识与量化绿地植被的蒸腾降温效益, 对于城市人居环境改善与绿色空间建设有着重要的指导意义。本文基于高分卫星影像与样地观测数据, 定量评估上海市绿地植被夏季降温效益发现, 上海绿地植被夏季 (6-9 月) 吸热量可达  $8.49 \times 10^{15}$  J, 相当于每公顷绿地日吸热  $7.26 \times 10^8$  J, 稍低于北京城市绿地日均吸热量  $8.4 \times 10^8$  J<sup>[16]</sup>, 原因在于北京城市绿地集中在建成区内, 环境温度明显高于郊区所致。不过, 绿地植被降温幅度受绿量、观测时间、周围地表环境以及气象环境等多种因素的影响, 准确量化城市绿地降温的实际效果较难, Shashua-Bar 等<sup>[56]</sup>观测发现, 绿地内部结构特征和与外部环境温度仅能解释 70% 的气温变化。城市环境温度易受建筑高度、区域气候以及地表覆被格局等因素的综合影响<sup>[19,32,57]</sup>, 本文仅从空气温度和人口密度两个方面来衡量人居环境的降温需求还较为简单粗糙, 未来研究应考虑纳入更多的气温影响因子。考虑到城市内部气象要素与植被分布的相似性, 以及绿地蒸腾降温效应几乎与太阳辐射日

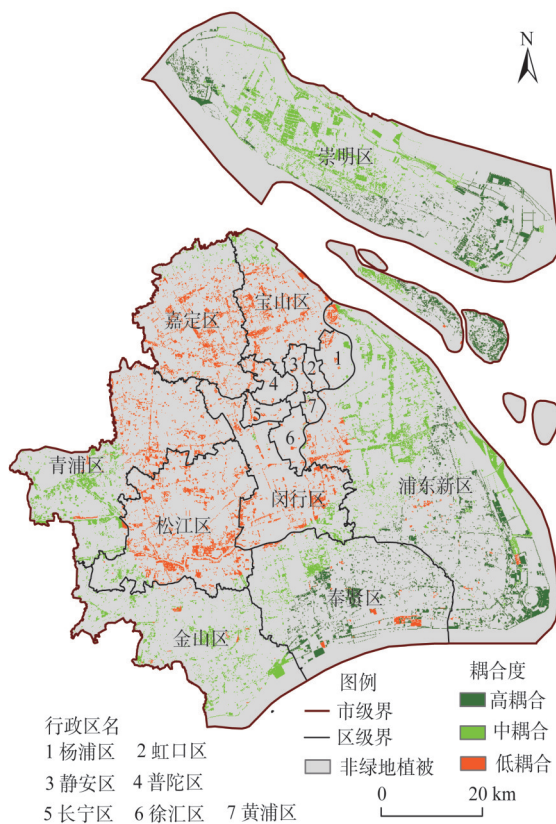


图 5 绿地植被夏季降温效益与空气温度耦合程度

Fig. 5 Harmonized levels between the cooling effects of green spaces and air temperature



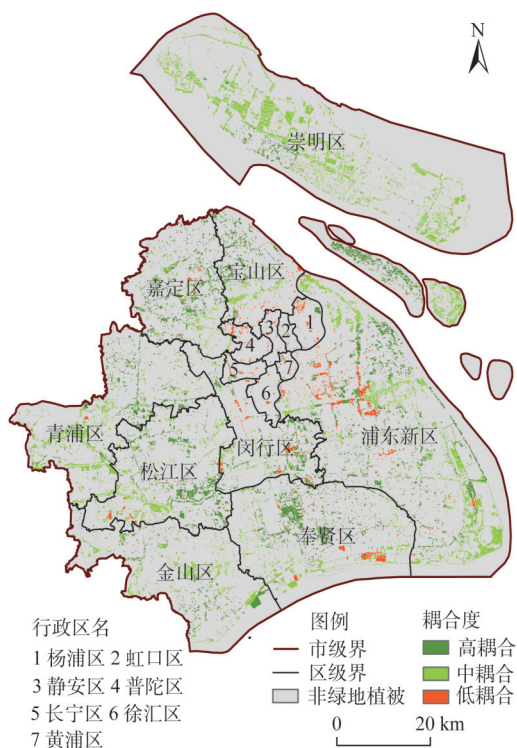


图6 绿地植被夏季降温效益与人口密度耦合程度

Fig. 6 Harmonized levels between the cooling effects of green spaces and population density

变化规律基本一致<sup>[58]</sup>，对绿地植被吸热降温效益进行不同地区和绿地类型的差异分析则具有一定程度的可行性。虽然利用MODIS LST、ASTER或Landsat 8等同时期影像反演的地表温度数据更加客观且一致性好，但是卫星影像获取的瞬时地表冠层温度不能准确反映出城市环境气温<sup>[59,60]</sup>。为此，本文基于现有样地降温观测数据的统计值作为绿地降温幅度具有一定的合理性。不过，仍需指出的是，城市绿地降温幅度观测、绿地植被类型提取以及周边环境温度差异等数据的误差，可能造成绿地植被吸热降温效益定量评估的不确定性，利用有无绿地植被两种情况下上海市夏季各区热量的对比分析，可能更有助于证明绿植降温效益。

此外，本文更为关注绿地降温效益与人居环境需求在空间上的一致性，为此重点比较分析了上海市绿地植被夏季降温效益与空气温度及人口

密度的空间耦合程度，发现城市绿地降温效益与环境温度的空间一致性明显低于降温效益和人口密度的空间耦合，说明上海市绿地建设布局较好地考虑了人口居住空间特征，但未满足中心城区及毗邻区城市环境气温的降温需求，因此需要重点关注中心城区绿地植被降温效益的有效发挥。有研究证实<sup>[24,27,61]</sup>，绿色植被也可降低周边地区一定距离范围内的环境气温。因此充分利用现有绿地植被对周边地区的辐射降温效应，以及借助河流、林荫道等生态廊道合理引入郊区绿地降温效益，均是有效提升上海市中心城区人居环境舒适性的重要途径。但是，不可否认的是，绿地植被降温功效与覆盖率、结构组成和绿量有着较大关系，仅考虑绿地类型、面积以及降温幅度的降温吸热经验模型还存在一定程度的误差，需开展更多的样地实际观测进行验证与数据支持。不过，本文核心目标不是评价上海市绿地植被的实际降温效果，而是比较分析城市绿地降温效益差异及其与人居环境需求的空间一致性，因此可为上海城市绿地的规划建设以及优化管理提供决策支持。

### 参考文献(References):

- [1] 史芸婷, 张彪, 高吉喜, 等. 基于城市热岛格局的绿地冷岛需求评估: 以北京市朝阳区为例. 资源科学, 2019, 41(8): 1541-1550. [SHI Y T, ZHANG B, GAO J X, et al. Demand of urban green space cool islands based on heat island pattern: A case study of Chaoyang district of Beijing. Resources Science, 2019, 41(8): 1541-1550.]
- [2] HUANG G, ZHOU W, CADENASSO M L. Is everyone hot in the city? Spatial pattern of land surface temperatures,



- land cover and neighborhood socioeconomic characteristics in Baltimore, MD. *Journal of Environment and Management*, 2011, 92(7): 1753-1759.
- [3] MAHMOUD S H, YEW G T. Long-term impact of rapid urbanization on urban climate and human thermal comfort in hot-arid environment. *Building and Environment*, 2018, 142: 83-100.
- [4] GOLDEN J S, HARTZ D, BRAZEL A, et al. A biometeorology study of climate and heat-related morbidity in Phoenix from 2001 to 2006. *International Journal of Biometeorology*, 2008, 52(6): 471-480.
- [5] TAN J, ZHENG Y F, TANG X, et al. The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. *International Journal of Biometeorology*, 2010, 54(1): 75-84.
- [6] SANTAMOURIS M, PAPANIKALOU N, LIVADA I, et al. On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. *Solar Energy*, 2001, 70: 201-216.
- [7] WANG Y Y, DU H Y, XU Y Q, et al. 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.
- [8] 陈颖峰, 王玉宽, 傅斌, 等. 成渝城市群城镇化的热岛效应. *生态学杂志*, 2015, 34(12): 3494-3501. [CHEN Y F, WANG Y K, FU B, et al. Heat island effect during the process of urbanization in Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(12): 3494-3501.]
- [9] 刘勇洪, 栾庆祖, 权维俊, 等. 基于多源卫星资料的京津唐城市群热环境研究. *生态环境学报*, 2015, 24(7): 1150-1158. [LIU Y H, LUAN Q Z, QUAN W J, et al. Research on heat environment of Beijing-Tianjin-Tangshan Urban Group based on multisource satellite data. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(7): 1150-1158.]
- [10] YAO R, WANG L C, HUANG X, et al. Interannual variations in surface urban heat island intensity and associated drivers in China. *Journal of Environmental Management*, 2018, 222: 86-94.
- [11] 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. *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. *Resources Science*, 2016, 38(6): 1028-1038.]
- [12] ZHANG B, XIE G D, GAO J 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. *Building and Environment*, 2014, 76: 37-43.
- [13] 晏海, 王雪, 董丽. 华北树木群落夏季微气候特征及其对人体舒适度的影响. *北京林业大学学报*, 2012, 34(5): 57-63. [YAN H, WANG X, DONG L. Microclimatic characteristics and human comfort conditions of tree communities in Northern China during summer. *Journal of Beijing Forestry University*, 2012, 34(5): 57-63.]
- [14] 张彪, AMANI-BENI M, 史芸婷, 等. 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. [ZHANG B, AMANI-BENI M, SHI Y T, et al. The summer microclimate of green spaces in Beijing' Olympic Park and their effects on human comfort index. *Ecological Science*, 2018, 37(5): 77-86.]
- [15] BOWLER D E, BUYUNG-ALIA L, KNIGHT T M, et al. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 97(3): 147-155.
- [16] 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. *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. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(24): 7698-7705.]
- [17] 孔繁花, 尹海伟, 刘金勇, 等. 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. [KONG F H, YIN H W, LIU J Y, et al. A review of research on the urban green space cooling effect. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(1): 171-181.]
- [18] SANTAMOURIS M. Cooling the cities: A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 2014, 103: 682-703.
- [19] ZITER C D, PEDERSEN E J, KUCHARIK C J, et al. Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer. *PNAS*, 2019, 116(15): 7575-7580.
- [20] FERRINI F, FINI A, MORI J, et al. Role of vegetation as a mitigating factor in the urban context. *Sustainability*, 2020, 12(10): 4247.
- [21] IMHOFF M L, ZHANG P, WOLFE R E, et al. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(3): 504-513.

- [22] RAHMAN M A, MOSER A, ROTZER T, et al. Within canopy temperature differences and cooling ability of *Tilia cordata* trees grown in urban conditions. *Building and Environment*, 2017, 114: 118-128.
- [23] LI X X, NORFORD L K. Evaluation of cool roof and vegetations in mitigating urban heat island in a tropical city, Singapore. *Urban Climate*, 2016, 16: 59-74.
- [24] 栾庆祖, 叶彩华, 刘勇洪, 等. 城市绿地对周边热环境影响遥感研究: 以北京为例. *生态环境学报*, 2014, 23(2): 252-261. [LUAN Q Z, YE C H, LIU Y H, et al. Effect of urban green land on thermal environment of surroundings based on remote sensing: A case study in Beijing. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(2): 252-261.]
- [25] 周媛, 石铁矛, 胡远满, 等. 基于城市气候环境特征的绿地景观格局优化研究. *城市规划*, 2014, 38(5): 83-89. [ZHOU Y, SHI T M, HU Y M, et al. Study on green space landscape pattern optimization based on urban climatic environment features. *City Planning Review*, 2014, 38(5): 83-89.]
- [26] HAMADA S, OHTA T. Seasonal variations in the cooling effect of urban green areas on surrounding urban areas. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2010, 9(1): 15-24.
- [27] 苏泳娴, 黄光庆, 陈修治, 等. 广州市城区公园对周边环境的降温效应. *生态学报*, 2010, 30(18): 4905-4918. [SU Y X, HUANG G Q, CHEN X Z, et al. The cooling effect of Guangzhou city parks to surrounding environments. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(18): 4905-4918.]
- [28] 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. *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. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(2): 383-394.]
- [29] KONG F H, YAN W J, ZHENG G, et al. Retrieval of three-dimensional tree canopy and shade using Terrestrial Laser Scanning (TLS) data to analyze the cooling effect of vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 217: 22-34.
- [30] AMANI-BENI M, ZHANG B, XIE G D, et al. 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.
- [31] FEYISA G L, DONS K, MEILBY H. Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect: An example from Addis Ababa. *Landscape & Urban Planning*, 2014, 123(2): 87-95.
- [32] CHEUNG P K, JIM C Y. Differential cooling effects of landscape parameters in humid-subtropical urban parks. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 192: 103651, Doi: 10.1016/j.landurbplan.2019.103651.
- [33] CAO X, ONISHI A, CHEN J, et al. Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 96(4): 224-231.
- [34] KONARSKA J, HOLMER B, LINBERG F, et al. 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: 2379-2395.
- [35] 余兆武, 郭青海, 孙然好. 基于景观尺度的城市冷岛效应研究综述. *应用生态学报*, 2015, 26(2): 636-642. [YU Z W, GUO Q H, SUN R H. Impacts of urban cooling effect based on landscape scale: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(2): 636-642.]
- [36] 上海市统计局. 2018年上海统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2018. [Shanghai Municipal Statistics Bureau. *Shanghai Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2018.]
- [37] 上海市规划和自然资源局. 上海市土地利用变更调查, 2018. <http://hd.ghzyj.sh.gov.cn/tdgl/tdbgdc/>. [Shanghai Municipal Bureau of Planning and Natural Resources. Survey of land use changes in Shanghai, 2018. <http://hd.ghzyj.sh.gov.cn/tdgl/tdbgdc/>.]
- [38] 贾艳青, 张勃, 张耀宗, 等. 城市化对长三角地区极端气温影响的时空分异研究. *自然资源学报*, 2017, 32(5): 814-828. [JIA Y Q, ZHANG B, ZHANG Y Z, et al. Effect of urbanization on spatial and temporal variation of extreme temperature events in the Yangtze River Delta. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(5): 814-828.]
- [39] 徐羽, 吴艳飞, 徐刚, 等. 长三角地区地表干湿状况及极端干湿事件特征研究. *自然资源学报*, 2017, 32(9): 1579-1590. [XU Y, WU Y F, XU G, et al. Characteristics of surface humidity and extreme drought/wet events in Yangtze River Delta. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(9): 1579-1590.]
- [40] 陈敏, 耿福海, 马雷鸣, 等. 近138年上海地区高温热浪事件分析. *高原气象*, 2013, 32(2): 597-607. [CHEN M, GENG F H, MA L M, et al. Analyses on the heat wave events in Shanghai in recent 138 years. *Plateau Meteorology*, 2013, 32(2): 597-607.]
- [41] 徐伟, 杨涵洧, 张仕鹏, 等. 上海城市热岛的变化特征. *热带气象学报*, 2018, 34(2): 228-238. [XU W, YANG H W,

- ZHANG S P, et al. Variations of the urban heat island effect in Shanghai. *Journal of Tropical Meteorology*, 2018, 34(2): 228-238.]
- [42] 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. [LUAN B, CHAI M W, WANG X. Review of development, frontiers, and prospects of green infrastructure. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(15): 5246-5261.]
- [43] VIDRIH B, MEDVED S. Multiparametric model of urban park cooling island. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2013, 12(2): 220-229.
- [44] DU H Y, CAI W B, XU Y Q, et al. Quantifying the cool island effects of urban green spaces using remote sensing Data. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 27: 24-31.
- [45] 陈佳瀛, 宋永昌, 王爱民. 上海外环林带小气候效应的研究(I). *生态环境*, 2005, 14(1): 67-74. [CHEN J Y, SONG Y C, WANG A M. Microclimatic effect of the outer-ring greenbelt in Shanghai(I). *Ecology and Environmental Sciences*, 2005, 14(1): 67-74.]
- [46] 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. [ZHANG M L, QIN J, HU Y H. Effects of temperature reduction and humidity increase of plant communities in Shanghai. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30(2): 39-43.]
- [47] 曹丹, 周立晨, 毛义伟, 等. 上海城市公共开放空间夏季小气候及舒适度. *应用生态学报*, 2008, 19(8): 1797-1802. [CAO D, ZHOU L C, MAO Y W, et al. Microclimate and comfortable degree of Shanghai urban open spaces in summer. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(8): 1797-1802.]
- [48] 高凯, 秦俊, 宋坤, 等. 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. [GAO K, QIN J, SONG K, et al. Fallen temperature effects at green patches of urban residential areas and analysis of its influence factors. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2009, 18(3): 50-55.]
- [49] 秦俊, 王丽勉, 胡永红, 等. 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. [QIN J, WANG L M, HU Y H, et al. Effect of plant community on temperature lowering and humidity increasing in residential areas of Shanghai. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, 25(1): 92-95.]
- [50] 王宗星, 虞木奎, 成向荣, 等. 上海市郊沿海防护林防护效应的研究. *植物资源与环境学报*, 2010, 19(3): 85-88, 96. [WANG Z X, YU M K, CHENG X R, et al. Study on protection effect of coastal windbreak in Shanghai suburb. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2010, 19(3): 85-88, 96.]
- [51] 姜荣, 陈亮, 象伟宁. 上海市极端高温天气变化特征. *气象与环境学报*, 2016, 32(1): 66-74. [JIANG R, CHEN L, XIANG W N. Characteristics of extreme high temperature weather in Shanghai. *Journal of Meteorology and Environment*, 2016, 32(1): 66-74.]
- [52] 程好好, 曾辉, 汪自书, 等. 城市绿地类型及格局特征与地表温度的关系: 以深圳特区为例. *北京大学学报: 自然科学版*, 2009, 45(3): 495-501. [CHENG H H, ZENG H, WANG Z S, et al. Relationships between the types, pattern characteristics of urban green space and land surface temperature: A case study in Shenzhen Special Economic Zone. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2009, 45(3): 495-501.]
- [53] 陈珂珂, 梁涛, 甘易猛, 等. 建筑和绿化布局对郑州市居住区小气候的影响. *河南农业大学学报*, 2016, 50(5): 674-682. [CHEN K K, LIANG T, GAN Y M, et al. Influence of the building and green space layout for microclimate in Zhengzhou residential. *Journal of Henan Agricultural University*, 2016, 50(5): 674-682.]
- [54] XIAO Y, WANG D, FANG J. Exploring the disparities in park access through mobile phone data: Evidence from Shanghai, China. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 181: 80-91.
- [55] 史军, 崔林雨, 杨涵洧, 等. 上海气候空间格局和时间变化研究. *地球信息科学学报*, 2015, 17(11): 1348-1354. [SHI J, CUI L L, YANG H W, et al. Spatial pattern and temporal change of climate in Shanghai. *Journal of Geo-Information Science*, 2015, 17(11): 1348-1354.]
- [56] SHASHUA-BAR L, HOFFMAN M E. Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: An empirical model for predicting the cooling effect of urban green area with trees. *Energy and Buildings*, 2000, 31(3): 221-235.
- [57] GAN Y M. Characteristics of the microclimate in residential areas of the different buildings and green layout. *Climate Change Research Letters*, 2016, 5(4): 239-249.
- [58] 王晓娟, 孔繁花, 尹海伟, 等. 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. [WANG X J, KONG F H, YINN H W, et al. Characteristics of vegetation shading and transpiration cooling effects during hot summer. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4234-4244.]



- [59] ROTH M, OKE T R, EMERY W J. Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. *International Journal of Remote Sensing*, 1989, 10: 1699-1720.
- [60] LI J, SSONG C, CAO L, et al. Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: A case study of Shanghai, China. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12): 3249-3263.
- [61] 蒯银鼎, 韩学孟, 武小刚, 等. 城市绿地空间结构对绿地生态场的影响. *生态学报*, 2006, 26(10): 3339-3346. [LIN Y D, HAN X M, WU X G, et al. Ecological field characteristic of green land based on urban green space structure. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(10): 3339-3346.]

## Assessment on the cooling effect of urban green spaces in Shanghai

ZHANG Biao<sup>1,2</sup>, XIE Zi-xia<sup>1,2</sup>, GAO Ji-xi<sup>3</sup>, SHE Xin-lu<sup>4</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Ministry of Ecology and Environment  
Center for Satellite Application on Ecology and Environment, Beijing 100094, China; 4. Renmin University of  
China, Beijing 100872, China)

**Abstract:** The phenomenon of urban heat island has become a critical environmental issue in many large cities. The trees and vegetation in the urban environment help to cool urban temperatures, whereas previous studies have concentrated on the field observation and factor analysis of cooling effect from urban green spaces in hot summer, but few studies have quantified the spatial coupling relationship between human settlement demand and cooling effect provision. This paper evaluated the cooling effect of urban green spaces in Shanghai based on the high-resolution images and observed results of typical sites, and analyzed their space consistencies between cooling effect and air temperature or population distribution with the help of GIS techniques. The results showed that, the green areas of Shanghai reached 104.5 thousand hectares in 2017, and could absorb  $8.49 \times 10^{15}$  J of heat via evapotranspiration in summer, implying that the cooling effect saved 1457 million RMB for the electricity consumption of air conditioners. Approximately 46% and 33% of cooling effect were provided by the broad-leaved forest and mixed forest, respectively, and the green spaces in Pudong New Area, and Chongming and Fengxian districts jointly contributed about 67% of cooling effect, whereas the per hectare green spaces in districts of Hongkou, Huangpu and Xuhui presented higher values of cooling effect. Inconsistency, in particular, between cooling effect and air temperature or population density was observed in some parts of Shanghai. Around 28.62% of cooling effect from urban green space was loosely coupled with air temperature, and 7.31% of green spaces generated the low coupling between cooling effect and population density, especially the low coupling areas distributed mainly in the central urban regions. Therefore, we propose to enhance the temperature reduction capacities of urban forest in central district, and import the cooling effect from suburban green spaces through ecological corridors.

**Keywords:** urban green space; cooling effect; value evaluation; space coupling; Shanghai