

蓝绿景观结构对城市热岛的减缓效应定量分析

姜允芳^{1, 2} 黄静³¹

(1. 华东师范大学 城市与区域科学学院, 上海 200241;

2. 中国现代城市研究中心, 上海 200241;

3. 华侨城中学, 广东 深圳 518053)

【摘要】: 在城市热岛影响城市热舒适性背景下, 蓝绿景观空间成为有效减缓城市热岛效应的重要途径。选取上海 18 条骨干河道滨水区域, 采用增长回归树(BRT)模型, 量化分析蓝绿景观空间形态结构因子与地表温度之间的边际效应互动影响关系。结果表明: 近郊区绿地冷岛效应最强, 远郊区次之, 中心城区最差。在绿地结构形态指标方面, 植被覆盖度和面积是影响绿地降温的主导因素。绿地覆盖度、面积、景观形状指数和地表反照率的边际效应阈值分别是 0.3、50hm²、2 和 0.16。在蓝绿网络结构指标方面, 水面率和距河岸距离影响作用较大。水面率越大, 降温越明显。距河岸距离和生态斑块集聚度的边际阈值分别为 400m 和 75/100。研究可为蓝绿景观空间应对全球气候变化发展提供有益指导。

【关键词】: 热岛效应 蓝绿空间 城市冷岛 增长回归树模型(BRT) 边际效应

【中图分类号】: X16 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)09-2060-13

随着城市规模的扩张和城市化进程的加剧, 城镇下垫面特征产生了明显的热辐射改变, 城市热岛效应越来越显著。植被和水体等自然表面被不透水地表代替导致长波辐射增加^[1,2], 不透水地表由于低反射率和高吸收率吸收更多的太阳辐射, 造成地表温度升高, 然后向外放出长波辐射, 加热近地面大气温度, 引起城市热岛效应^[3,4]。城市热岛效应除了影响人类热舒适度, 还会加重空气污染导致空气质量恶化, 引起呼吸系统疾病等的发生, 对人类身体健康产生有害影响^[5,6]。城市蓝绿空间, 包括河流、湖泊、水库等水体和公园、花园、草地和森林等绿地, 具有显著调节城市微气候的重要生态功能^[7,8,9,10]。城市蓝绿景观系统减缓热岛效应降温, 是碳减排间接作用的重要途径。

城市蓝绿空间形态结构因子的合理组织是影响城市热岛格局的关键因素。绿地结构形态对降低地表温度的影响因子, 通常包括面积、形状指数、绿地覆盖度和空间分布等^[11,12,13,14]。目前, 这些影响空间因子的降温效应关联特征和阈值方面有一些初步研究结果。绿地面积大小与降温效应呈正相关, 大绿地斑块能够提供较显著且稳定的降温^[15,16,17]。不同城市的降温阈值不同, 在厦门的研究中, 发现绿地发挥最佳效应面积阈值为 55hm²^[18]。绿地几何形状与冷岛效应呈负相关, LSI 越小越有利于发挥稳定降温作用^[19,20,21]。绿地覆盖度与温度呈负相关性, 一般来说, 高覆盖度具有更低的地表温度^[22,23]。当绿地覆盖度大于 30%时, 绿地对热岛有明显的削弱作用, 当绿化覆盖率大于 50%, 绿地对热岛的削弱作用极其明显^[24]。绿地覆盖区域地表反照率的增大使地表温

作者简介: 姜允芳(1972~), 女, 教授, 主要研究方向为生态城市与人居环境. E-mail:yfjiang@re.ecnu.edu.cn; 黄静, E-mail:jhuang@stu.ecnu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878279;51878418)

度有所降低^[25]。除此之外，绿地空间之间的空间集聚关系也影响绿地的降温效应^[26,27]。

水体形态指标的热环境影响因子，主要包括水体面积、宽度、形状、周边环境和水体位于城市主导风向的位置^[28,29,30]。水面面积与降温强度和降温距离显著正相关^[31,32]，水体面积的阈值在 50hm² 左右^[33]。宽度越大的河流，缓解热环境的能力越强^[34,35]，几何形状简单的水体具有更好的降温距离和降温强度^[36]。水域的下风向地区比上风向地区可获得高于 1.5℃ 的降温强度^[37]。高水面率有利于减缓城市热岛效应^[38]。蓝绿空间组构协同冷岛效应远高于单一生态元素效应^[39,40]。蓝绿景观空间的网络模式对城市河流的冷空气的输送起到了好的影响^[41]。

城市滨水区通常是城市居民首选的公共活动空间。城市河流两侧绿地以何种空间格局模式达到在炎热季节里城市冷岛作用最大化，成为城市热环境适应性研究重点。本研究选择特定的上海典型研究区域。利用机器学习算法，分析滨水绿地空间各结构形态指标在降低地表温度上的贡献比例和重要程度；并进一步研究其结构形态指标在减缓地表温度方面的边际效应特征。研究可以为气候适应型规划提供城市蓝绿空间规划设计量化指标控制依据和景观格局优化方法。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

上海市地处 120° 51' E~122° E 和 30° 41' N~31° 53' N,属于亚热带季风气候，夏季炎热潮湿。上海降水充足，水资源丰富，境内江河湖塘相间，河网交织密布，大多数属于黄浦江水系。本研究选取黄浦江东西和南北走向河段围合区域作为研究区域。该区域的城市河网水系相对完整，且众多的河网水系提供了大量的绿色空间，绿地类型多样。由于该区域有着高密度连绵成片的建设区域，这个区域热环境空间分布差异非常明显。本文选取《2019 上海市河道(湖泊)报告》中的骨干河流水系及缓冲区作为研究区^[42]。

根据河流宽度大小，以城市街区形态完整和道路边界为缓冲区域边界(图 1)。河流宽度等级，根据《河道建设规范(DB33/T614-2016)》中关于平原河网河道等级划分技术标准，按照 30、30~70m、以及大于 70m 确定河流等级^[43]。

在河流影响要素的研究中，已经有研究表明河流的宽度和流经的区域是影响周围温度的两个根本因素^[34]。有与上海有相同气候条件的平原河网城市武汉的研究发现，不同水体的降温阈值距离分别有 550、780、1000、1500、1700m^[44]。在本研究中，利用不同阈值距离的研究数据和河流等级管理数据，并考虑到上海研究区河网分布特征和 LST 值分布的显著差异，确定了研究区域内城市河流的 4 个宽度分类：



图 1 研究区概况

宽度介于 20~30m 之间的河流，其缓冲区为距离河岸 500~800m 不等；宽度介于 30~70m 之间的河流，其缓冲区距离河岸 800~1500m 不等；宽度大于 70m 的河流，其缓冲区为距离河岸 1500~2500m 不等。

1.2 研究方法

1.2.1 数据获取与影响热环境结构形态因子体系建构

采用 2017 年 GoogleEarth 下载的高清晰影像，参照调研获取的 2015 年的比例尺为 1:50000 的规划部门道路网络地形图矢量数据，在 ArcGIS 软件平台上，选取地面控制点 GCP 进行几何精校正；水网和绿地影像识别采用人工可视化解译和实地补充调查相结合的方法，最后获得研究区水网和 4550 个绿地斑块的空间分布(图 2)。

研究区域蓝绿空间的降温效应与绿地的空间形态因子有关，也与水体的位置以及蓝绿空间之间的空间结构有关。本文采用 8 个指标来描述蓝绿景观格局的空间特征(表 1)。

(1) 绿地面积 (Area)

绿地斑块占地面积。在 ArcGIS10.4 软件平台上计算绿地斑块的面积。

(2) 植被覆盖度 (Fv)

植被覆盖度 Fv 是指植被(包括叶、茎、枝)在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比，是刻画地表植被覆盖的一个重要参数，计算公式如下^[45, 46]。

$$Fv = \frac{[NDVI - NDVI_{Soil}]}{(NDVI_{Veg} - NDVI_{Soil})} \quad (1)$$

$$NDVI = \frac{(R_{NIR} - R_{Red})}{(R_{NIR} + R_{Red})} \quad (2)$$

表 1 基于降温效应的多维空间变量描述蓝绿空间系统的结构形态指标体系

影响变量	空间因子	定义和描述
绿地空间形态因子	绿地面积 (Area)	绿地斑块占地面积大小，单位 (m ²)
	植被覆盖度 (Fv)	植被覆盖度反映树冠的垂直覆盖，Fv 值范围从 0 到 1 不等
	景观形状指数 (LSI)	景观形状指数表示形状的复杂性，通过计算绿地地块的形状与同一区域的正方形之间的偏差程度来衡量
	地表反照 (Albedo)	表面反射通量与太阳辐射通量在绿地表面的比例。这些数据是在软件 ENVI5.3 平台上，通过 Landsat8 数据估算获得
蓝绿空间结	绿地方位 (L)	该位置是绿地相对于河流的位置，根据主导风向和绿地相对于河流的位置来定义

构因子	生态斑块集聚度 (Cohesion)	Cohesion 是蓝绿色生态网络的集聚度, 描述研究中的蓝绿生态网络的连接度, 在 fragstats4.3 软件中计算
	水面率 (Wr)	绿地周边水体面积的比例大小, 描述周边水体对绿地降温的影响
	绿地距河岸距离 (D)	绿地几何中心与河岸之间的距离, 代表水体对绿地冷却效应的影响

式中: F_v 为植被覆盖度; $NDVI$ 为归一化植被指数; R_{NIR} 是近红外波段; R_{red} 是红外波段; $NDVI_{Soil}$ 为完全是裸土或无植被覆盖区域的 $NDVI$ 值, 取经验值 $NDVI_{Soil}=0.05$; $NDVI_{veg}$ 则代表完全被植被所覆盖的像元的 $NDVI$ 值, 取经验值 $NDVI_{veg}=0.7$ 。

(3) 景观形状指数 (LSI)

景观形态指数 (LSI) 表示绿地形状, 是通过计算某斑块的形状与其同面积的正方形之间的偏离程度来描述表示斑块形状复杂程度。具体计算公式为^[47]:

$$LSI = \frac{0.25L}{\sqrt{A}} \quad (3)$$

式中: LSI 表示景观形态指数; L 为绿地地块周长; A 为绿地面积。

(4) 地表反照率 (Albedo)

绿地地表反照率 (Albedo) 是绿地地表向各个方向反射的太阳短波辐射与太阳总辐射的比值, 表征绿地地表对太阳辐射的反射能力^[48,49]。绿地地表反照率 (Albedo) 关联了绿地空间植被覆盖以及邻接周边环境, 表示绿地植被特征以及周边环境三维形态对绿地的综合影响, 造成绿地内部地表对太阳辐射吸收和反射存在差异。本研究利用 Landsat-TM 数据的反演模型对应到 Landsat8 数据的反演中, 估算了研究区的地表反照率^[50]:

$$Albedo = 0.356 B_2 + 0.130 B_4 + 0.373 B_5 + 0.085 B_6 + 0.072 B_7 - 0.0018 \quad (4)$$

式中: B_2, B_4, B_5, B_6, B_7 分别表示 Landsat8 数据的蓝、红、近红外、短波红外 1 和短波红外 2 波段。

(5) 方位 (L)

方位是绿地相对于河流的位置。根据夏季主导风向和绿地相对于河流的位置定义。具体分为上风向绿地和下风向绿地类型。

(6) 生态斑块集聚度 (Cohesion)

斑块集聚程度是评价景观空间结构特征的连通度的有效指标。本文选用了斑块内聚力指数 Cohesion 来表示每个绿地斑块在整个蓝绿生态网络整体中的连通度, 以此来衡量绿地的自然状态连通度。随着各斑块分布越来越集聚, 自然连通度提高, Cohesion 指数数值越高。该指数在 fragstats4.2 软件平台中计算, 计算公式为^[51]:

$$Cohesion = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{ij} \sqrt{a_{ij}}} \right] \left[1 - \frac{1}{\sqrt{A}} \right]^{-1} \times 100 \quad (5)$$

式中：i 为景观类型；j 为斑块数量；n 为景观类型 i 中斑块之和；m 为景观类型之和； a_{ij} 为斑块的面积； P_{ij} 为斑块的昼长。 $0 \leq Cohesion \leq 100$ 。

(7) 水面率 (Wd)

水面率是指一定区域范围内承载水域功能的区域面积占区域总面积的比率^[52]。在 ArcGIS10.4 软件平台上统计每个分区面积大小和水体面积大小，然后通过比值得到绿地斑块水面率。

(8) 绿地距河岸的距离 (D)

绿地与邻近河流的距离是绿地中心到河岸的最短几何距离。在 ArcGIS10.4 中提取绿地斑块几何中心点，然后利用邻近距离 (Near) 分析工具^[53]，计算每个绿地地块边缘到邻近河流岸线的最短距离。

1.2.2 地表温度 (LST) 反演与绿地降温差异分析

在遥感图像处理软件 Envi5.3 上进行地表温度反演。使用的遥感影像数据为美国地质调查局 (USGS) 于 2017 年 8 月 24 日 10 点 25 分 (中国时间) 拍摄的 LANDSAT8 卫星影像，云量为 0.4%。该过程分两步进行。首先，对该卫星影像的 Band10 热红外数据进行辐射定标和大气校正。然后反演地表温度。由于单窗算法的大气透射率和大气平均温度等参数难以获取，上海水汽含量较大而单通道算法受大气水汽含量影响较大^[54]，不适用上海地域范围。本研究采用辐射传输方程反演获得地表温度 LST 数值的方法，该反演算法精度高于其他算法^[55]。反演得到上海市主城区的地表温度 (图 2)，输入到 ArcGIS 平台，采用 ArcGIS 的分区统计工具 (Zonal analyst tool) 统计各个绿地斑块的平均地表温度数据。

为量化研究区绿地斑块降温效应状况，进一步比较计算绿地冷岛降温强度等级。将研究区域根据上海市建成区域特征，以外环线 and 郊环线划分上海城区、近郊区和郊区。计算每个区片的地表温度均值。通过计算绿地所处片区均温与绿地斑块均温的相对温差数值，以温差区间为小于 0.3、0.3~0.5、0.5~1.5、1.5~2.5、2.5~3.5、3.5~4.5 和大于 4.5 将冷岛强度划分 7 个等级。

1.2.3 BRT 回归模型分析空间因子降温作用

BRT 模型是回归模型 (regression trees) 和增长模型 (boosting) 的结合，是一种机器学习的研究方法，结合了回归模型 (regression trees) 和增长模型 (boosting) 的优势^[56]。BRT 模型被广泛应用在研究城市扩展及其影响因素^[57]、识别冷空气路径发生的最重要的预测变量^[58]等城市研究中。近年来，BRT 模型也应用在城市热岛效应与城市二维、三维指标的关系研究方面^[59]。

采用增长回归树模型 (Boosted Regression Trees model, 简称 BRT model) 来分析各空间因子在综合环境多要素共同影响下与地表温度的关联互动作用，剖析各空间因子对 LST 的降温贡献程度和降温影响作用阈值。其中，因变量是绿地斑块的地表温度，自变量为各项指标。模型参数设置如下：决策树复杂程度 (tree complexity) 为 5，学习速率 (learning rate) 为 0.01，分割比率

(bag fraction)为 0.5,数据类型为高斯分布(gaussian)。采用交叉验证法对模型预测性能进行比较,模型每次随机抽取 50%的数据进行分析,50%用于训练,进行了 10 倍交叉验证,来估计最佳树的数量。

2 结果

2.1 滨水绿地地表温度(LST)空间分布特征

研究区滨水绿地斑块 LST 温差高达 14.1℃。根据绿地斑块冷岛强度等级图(图 2),可以看出,由于各片区的绿地结构形态的差异,造成其下垫面空间要素对热辐射的敏感性质不同,地表温度分异显著。因而,不同空间格局的滨水绿地对城市热岛的缓解作用也存在一定差异。

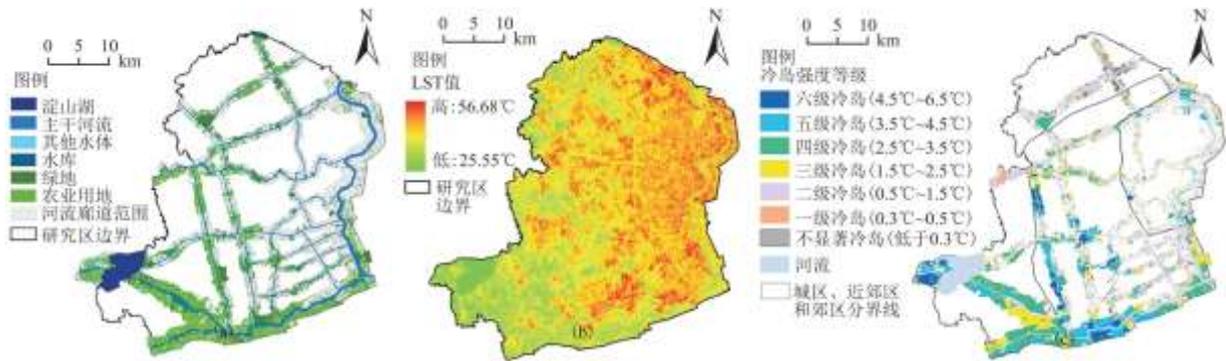


图 2 研究区蓝绿景观空间分布、地表温度与冷岛强度等级分布图

注: (a) 蓝绿空间分布; (b) 地表温度分布; (c) 绿地冷岛强度分级。

比较城市化发展的 3 个圈层,滨水绿地空间降温强度最大的区域在近郊区。这个区域的滨河绿地降温等级大多是第五和第六等级的城市冷岛。其它基本降温分布等级为第三和第四级的城市冷岛。近郊区位于毗邻中心城区,分布较大面积规模的公园等绿地斑块和城市中等开发强度的建设用地。由于这个区域在开发建设过程中有着较为合理的蓝绿空间规划布局,且城市化发展过程滨水绿地大量建设,兼顾了城市建设和居住舒适功能,城市滨河绿地的降温强度非常显著。

远郊区的滨水绿地对比周边区域的冷岛效应降温作用不明显。远郊区的绿地农业用地比重较大,造成其绿地冷岛级差不大。这个区域的滨河绿地降温等级多分布第三、第四级的城市冷岛,只有少数滨水绿地属于第五和第六级的城市冷岛。

中心城区滨水绿地的降温强度作用小。这个区域的滨河绿地降温等级主要属于第一、第二和第三级的城市冷岛。建成环境由于建筑过于密集,绿地斑块小,冷岛效应较弱。在近水区,绿地冷岛效应还比较明显。然而,在河流冷岛影响较小的远离河岸区域,滨水绿地冷岛降温作用很差。同时,建成环境由于建筑过于密集,绿地斑块小,绿地基本没有发挥较好的城市冷岛效应。

2.2 蓝绿空间形态因子对 LST 的贡献率分析

采用 BRT 模型测算河流廊道滨水绿地各空间因子对地表温度降温的贡献率(图 3),发现覆盖度(35.21%)、面积(29.10%)、水面率(16.68%)、离岸距离(6.40%)、形状指数(4.54%)、生态斑块集聚度(4.05%)和地表反照率(3.67%)是最重要的影响变量。覆盖度、面积、形状指数和地表反照率都属于描述绿地形态的指标。对于绿地降温而言,绿地的组成和形态是主导因素。特别是覆盖度和面积的总贡献率高达 64.31%,这两个因子对地表温度其影响显著。蓝绿生态网络形态指标对地表温度的贡献有一定的影响。

水面率和离岸距离对地表温度的影响较大,贡献率分别排名第三和第四位,是影响LST的主要因素,两者贡献率之和达到23.08%。其他因素的贡献率较低,绿地位置的影响最小,仅为0.35%。

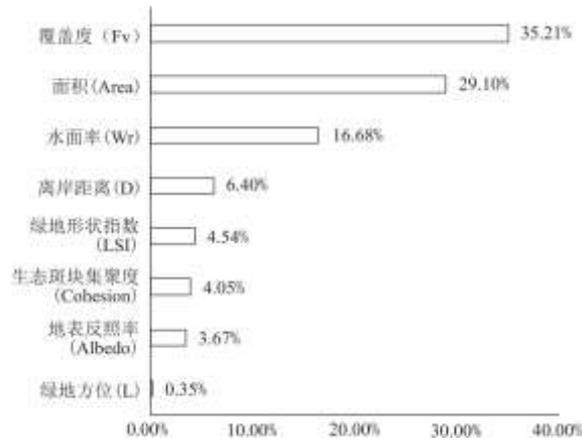


图3 蓝绿空间系统的各空间因子对LST的贡献率

2.3 蓝绿空间形态因子与LST的边际效应影响分析

通过上述贡献率分析可知,对于水网密集的城市区域,对LST产生重要影响的变量主要有植被覆盖度、面积、宽度、离岸距离、形状指数、连通度指数和地表反照率等7个空间因子。在河道纵横交错影响下,绿地方位的影响小,本文不进行降温影响作用分析。通过BRT模型可以进一步分析各指标因子对地表温度影响的边际效应变化情况。边际效应曲线表示随着影响因子取值的变化,其对地表温度的影响效应也随着变化^[60]。曲线呈上升趋势表示因子与因变量呈正相关,反之,则呈负相关。曲线倾斜程度表示影响强度。

2.3.1 绿地空间形态因子影响

(1) 植被覆盖度(Fv)

植被覆盖度对地表温度的影响表现出显著的负相关关系(图4a)。在多因素共同影响作用下,随着覆盖度的增加,植被对地表温度的降温作用越来越强,按照曲线倾斜程度可将边际效应曲线分为3个区间段。第一区间段为Fv数值小于0.3;第二区间段为0.3~0.62;第三区间段为Fv数值大于0.62。

当植被覆盖度小于0.3时,曲线急剧升高而又趋于平缓,覆盖度与LST不遵循负相关性规律,主要是由于当覆盖度较低时,绿地斑块主要受到周边建成环境或其他要素干扰影响较大。当覆盖度大于0.3时,覆盖度对LST开始产生显著降温影响,随着覆盖度的增加,边际效应曲线呈下降趋势,其对地表温度的降温作用稳定增强。当达到0.62之后,边际效应曲线急剧下降,降温强度增大。

(2) 绿地面积(Area)

绿地面积与LST的边际效应曲线呈下降趋势表明,面积规模与地表温度的边际效应显著负相关(图4b)。同时,面积规模对地表温度的影响是非线性关系,存在一定阈值。随着绿地面积的增加,地表温度随之降低,当面积规模达到50ha后,LST变化趋于稳定,边际效应的有效影响达到阈值。同时,在边际效应阈值内,小规模面积曲线倾斜角度大表明对LST影响大,这主要是

由于绿地面积较小的绿地斑块更多分布在滨水岸边，这个规模尺度的绿地受到水体作用影响大，绿地和水体水绿协同降温效果强。因而，在近水区域结合水绿协同降温设置各种形态的绿地易于达到最佳降温效果。

(3) 景观形状指数 (LSI)

绿地斑块的景观形状指数数值大部分分布在 1.05~6 之间。形状指数越大，绿地斑块形状越复杂。边际效应曲线整体上呈上升趋势表明形状指数与温度呈正相关关系(图 4c)，表明随着形状指数的增大，地表温度的边际效应变化也逐渐增大。景观形状指数小于 2 时，边际效应曲线升高倾斜角度较大，呈现出两者正相关性最显著。即，在绿地面积较小的情况下，绿地形状简单，LSI 数值越小，绿地内部地表温度越低且稳定。这也证明前期相关研究结论，对于城市建成环境内部较小绿地斑块，在景观形状指数为 2 时，达到地表温度变化的最大效应。在 LSI 数值大于 2 时，边际效应曲线呈波动上升趋势，受到其它绿地形态因子的影响，它与地表温度的相关性不明显。当 LSI 数值大于 5 时，对应绿地规模大，且形状复杂，LSI 继续增大，产生绿地内部地表温度降低，两者出现负相关性。即，大型绿地斑块，当 LSI 大，一定程度上增加了该绿地斑块与周边生态斑块(水体和绿地)之间的渗透和联系，产生好的降温效应。

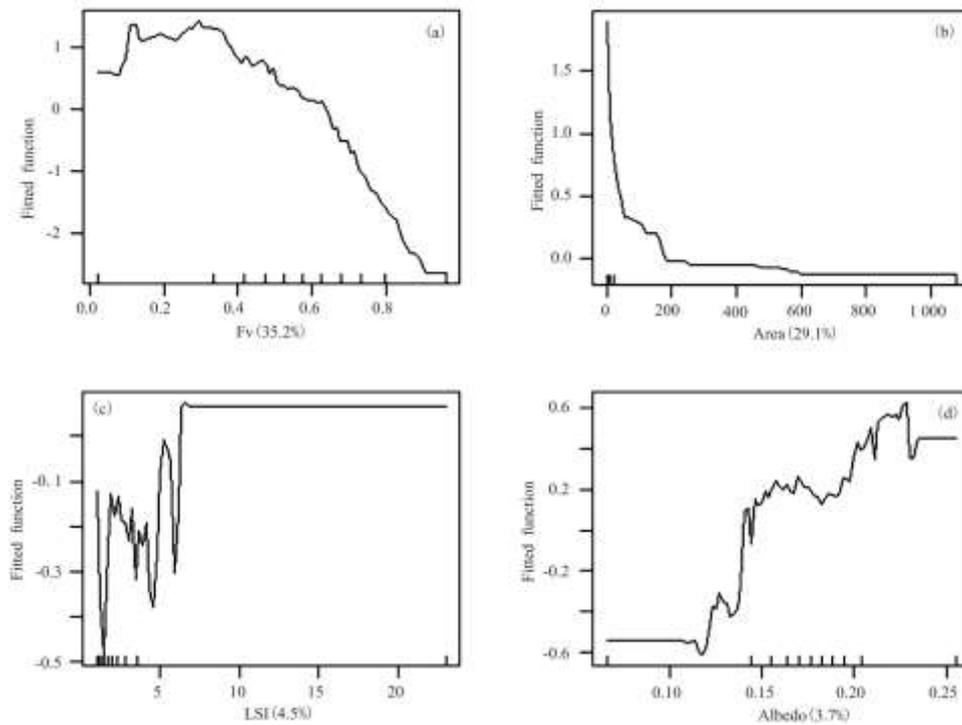


图 4 绿地空间形态因子对 LST 的边际效应曲线

注：(a) 植被覆盖度；(b) 绿地面积；(c) 景观形状指数；(d) 地表反照率。

(4) 地表反照率 (Albedo)

地表反照率变化受植被类型和土壤表层含水量的共同影响。在上海这样一个水网密集的研究区域，地表反照率与绿地地表温度之间的关系比较复杂，呈现正负相关性(图 4d)。主体绿色覆盖较好的绿地斑块，两者是负相关关系。地表反射率的数值在 0.10~0.13 区间，反照率对 LST 的边际效应变化来说是正相关关系。即，绿地植被较少的用地，反照率总体较小，随着植被增加，反照率增大，地表温度边际效率变化趋于下降；地表反射率的数值在 0.13~0.16 区间，植被较多，反射率增加，植被和土

壤含水量增多,蒸腾作用产生明显发生降温变化,反照率与绿地地表温度呈现正相关性;在0.16~0.19区间,植被进一步的增加使得地表蒸散加强,影响土壤含水量,降温作用在继续,但变化增加量在减少,所以两者出现负相关特征。在大于0.19时,大部分这种反照率区域是农业用地和草地占据主导,反照率大,但是地表温度相对较高,反照率和绿地地表温度呈现正相关性。

2.3.2 蓝绿空间结构因子影响

(1) 离岸距离(D)

滨水绿地的LST数值分布受到距河岸距离的影响较为显著。当距离小于400m,距离与LST显著正相关(图5a)。水体的冷岛作用和400m距离范围的绿地冷岛之间产生协同降温影响。该段曲线斜率较大,说明两者之间的协同冷岛作用影响大。水绿协同降温效应在400m达到效应阈值。当距离大于400m时,由于不同宽度差异性造成规律不明显,边际效应曲线波动变化。当距离达到1500m之后,随着距离的增加,温度升高,降温衰减,衰减规律明显。

(2) 水面率(Wr)

水面率与滨水绿地LST的边际效应曲线表明水面率对LST降温影像显著(图5b)。水面率边际效应曲线总体呈下降趋势,水面率与地表温度呈负相关。在0.11范围内,水面率对滨水绿地的降温作用随着水面率的增加显著增强。水面率大于0.11,由于数据量较少,水面率对不同区位的绿地LST的变化影响不显著,降温规律不明显。

(3) 生态斑块集聚度(Cohesion)

生态空间的集聚度与地表温度的边际效应曲线总体上呈下降趋势,表明集聚度与地表温度呈负相关性(图5c)。局部上看,较低集聚度绿地降温作用不显著,当集聚度达到一定程度,集聚效应产生明显降温影响。当集聚度指数小于75(总值确定为100)时,较低集聚度绿地分布破碎,易受周边复杂特殊环境影响,地表温度较高,降温效应不显著。随着各斑块分布越来越集聚,斑块内聚力指数提高,绿地生态网络自然连通度提高,有利于空气流通与能量交换,促进绿地降温。当集聚指数大于75时,边际效应曲线随着集聚度的增大呈波动下降趋势,曲线下降倾斜角度较大,集聚度对地表温度产生显著降温作用。

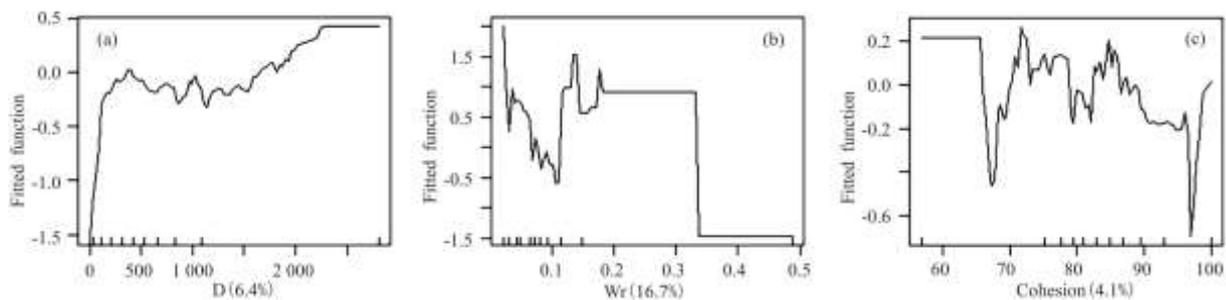


图5 蓝绿空间结构因子对LST的边际效应曲线

注: (a) 离岸距离; (b) 水面率; (c) 生态斑块集聚度。

3 讨论

3.1 研究要素影响作用的有效性分析

前期研究方法中,蓝绿空间结构形态因子与地表温度之间关联分析,获得了各因子的降温影响作用规律。为了检验结论的有效性,研究进一步采用 LANDSAT8 卫星遥感影像的另一个时段数据进行比较分析。选取同一数据平台美国地质调查局(USGS)网站数据,2016年7月20日10点25分(中国时间)这个时段影像成像质量好。同时,该数据存在与2017数据具有空间因子变化相对较小,仅因为植物生长状况和时期不同产生的绿地空间覆盖度(Fv)的演变差异性。通过 Envi5.3 上进行地表温度反演获得该期地表温度数据,将蓝绿空间因子 Fv 进行数据更新。两期的空间指标因子对 LST 地贡献率及重要因子的边际效应来进行比较验证。

两年份的空间因子对地表温度贡献率数值对比如表 6 所示,影响因子的重要程度基本一致。通过 2016 年数据验证得到重要空间因子影响 LST 的排序基本上是覆盖度/面积、水面率、离岸距离、地表反照率和生态斑块集聚度等。其中,覆盖度和面积这两个描述规模指标的重要性出现了不一致。对比两份年的地表温度和植被覆盖度的系列图(图 6),可以发现,植被覆盖度数值在 2016 年总体上都低于 2017 年度,造成 2016 年的 LST 整体高于 2017 年度。主要是因为两期遥感影像植被覆盖度有着明显差距,植被生长时期不同,植物的生长状况在不同年份存在生命周期的差异,表现出来 2017 年的植被覆盖度整体优于 2016 年度。

表 2 2016 和 2017 年蓝绿空间系统的各空间因子对 LST 的贡献率

空间因子	2017 年	2016 年
覆盖度 (Fv)	35.21%	24.20%
面积 (Area)	29.10%	29.02%
水面率 (Wr)	16.68%	22.27%
离岸距离 (D)	6.40%	7.85%
地表反照率 (Albedo)	4.54%	5.61%
生态斑块集聚度 (Cohesion)	4.05%	5.39%
绿地形状指数 (LSI)	3.67%	5.00%
绿地方位 (L)	0.35%	0.66%

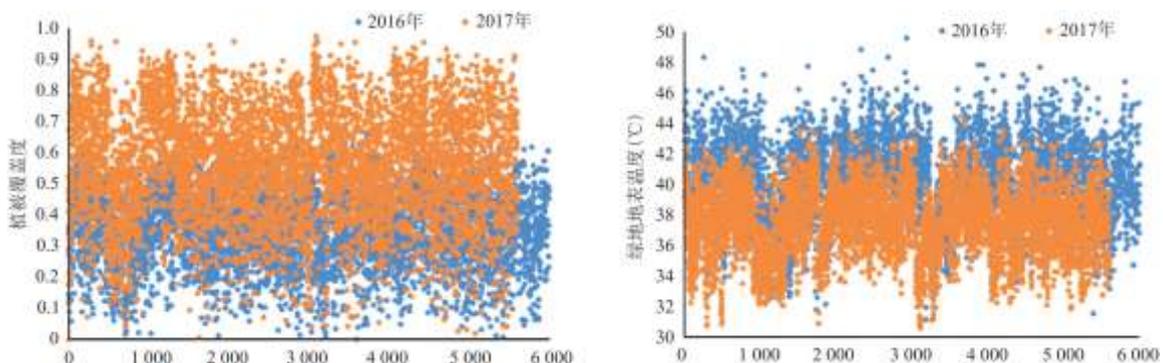


图 6 2016 和 2017 年地表温度和植被覆盖度的数据分布比较图

尽管覆盖度和面积这两个描述规模指标的重要性比例出现了变化,但是对比分析两个时期的植被覆盖度因子和面积因子与

LST 之间的边际效应, 可以发现, 两因子的边际效应阈值作用是基本一致。植被覆盖度与地表温度呈负相关关系, 并且对 LST 的影响作用也是分为了 3 个区间段。在不同区间段对 LST 的影响作用与 2017 年的一致(图 7a 和 7b); 面积的边际效应曲线表明面积规模与地表温度呈负相关关系, 同时根据边际效应曲线可知面积的降温阈值同样为 50ha(图 6c 和 6d)。

3.2 分区差异化发展策略

在中心城区域, 蓝绿空间协同降温效应显然受到了绿地规模和生态集聚程度的影响。为了最大化提升蓝绿空间的降温效应, 可以通过城市更新过程适度增加滨水绿带的宽度; 同时, 加强滨水绿带的连通性、水体和绿地的通达性以及滨水缓冲区域绿地斑块之间的网络结构, 从而达到提高该区域的绿地生态集聚度, 产生整体蓝绿系统的降温协同效应。绿地与河流的连通性的增强, 加强了河流和滨水区域绿地之间冷空气的流通, 产生冷源空气更大的降温影响距离和降温强度。

在近郊区域, 目前蓝绿空间降温效应较好, 进一步优化的重点是提高滨水区域整体连通性, 增加生态集聚度。近郊区东南部是规划主城区范围, 开发强度相对较大, 在近水绿带空间呈现出蓝绿空间较强的降温效应。但是, 缓冲区域距水较远的绿地空间降温作用较差。因此, 重点提升近郊区东南部成片建设区绿地格局, 在有限的绿地面积上加强绿地植被覆盖度, 某些重要区域增加规模较大的公园绿地。同时, 增强蓝绿空间网络的连通性以及绿地斑块的集聚, 将促进蓝绿网络内部冷空气流通, 产生城市蓝绿冷岛在该片区的大范围覆盖。

在远郊区域, 尽管整体热环境比较其它两个城市化圈层好。然而, 该区域蓝绿空间降温变化梯度不大。造成这一现象的主要原因是郊区绿地主体是农业用地, 植被覆盖度成为制约这个片区的主导因素。研究区最北端的河流两侧绿地冷岛效应特别差, 这主要是受到工业用地的影响, 滨水区域绿地规模小, 植被覆盖度也很低。因此, 这个区域需要增加植被多样化类型, 培育滨水较宽尺度绿带空间; 在农田分布区域, 增加农田林网的格局建设, 形成生态林地格网状结构, 从而增加了植被覆盖度和生态集聚程度; 在北郊工业区影响的河流段, 应增加设置大型隔离带状绿地; 适当提高工业用地内部绿地结构的完整性, 保证区域蓝绿空间的网络协同降温作用。

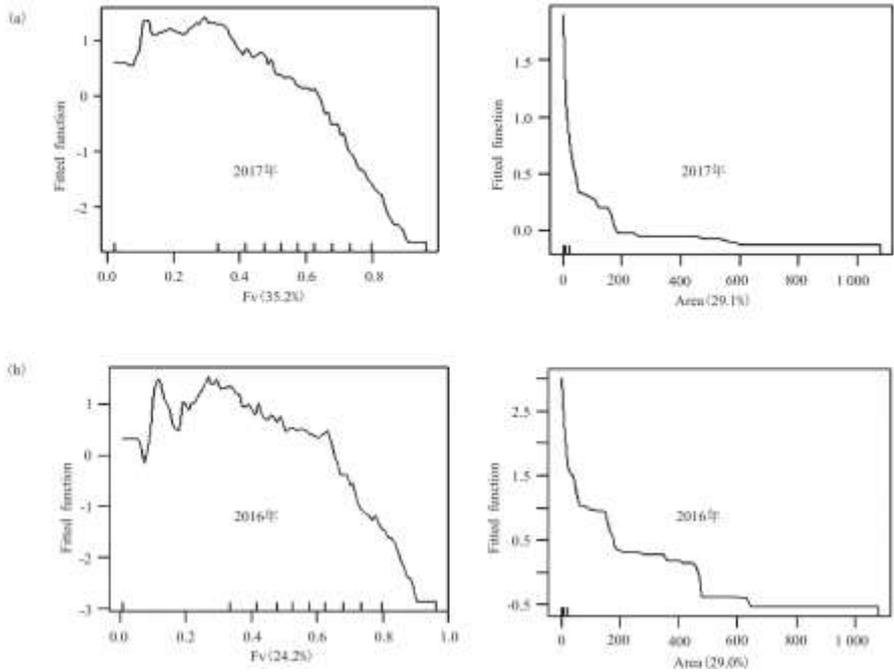


图 7 2016 和 2017 年 Fv 因子和面积因子对 LST 的边际效应曲线

注：(a)2016 年度；(b)2017 年度。

3.3 蓝绿空间阈值指标与空间格局发展指导

在绿地结构形态层面，在 50hm² 规模范围内，面积越大，冷岛效应越强。因此，在有限的城市建设空间中，最优化的降温效应大型绿地应该考虑 50hm² 的绿地规模。大于在绿地斑块形状指数控制方面，在绿地规模较小时，绿地形态越简单，尤其是圆形和正方形，在一定程度提高绿地内部空间降温作用越明显；在绿地规模较大时，绿地与周边区域交错越复杂，该绿地对周边区域缓冲热岛作用越好；另外，绿地植被覆盖度大于 0.3 开始发挥降温效应，大于 0.62 具有显著强烈的降温效应。对应城市规划中的绿化覆盖率指标，城市建设空间绿地率至少要达到 30%，具有较好热舒适的公园绿地和游憩休闲绿地在规划中需要保证绿化覆盖率控制在不低于 62%。

在蓝绿网络结构层面，周边其他水体的降温影响较为重要，周边环境水面率越大，与绿地的协同降温作用越强。当水面率在 0.11 范围内，水面率越大，降温边际效应越明显。因此滨水绿地以及周边水体布局之间的蓝绿网络构建是重点工作；应合理布局滨水绿地廊道水体与绿地，加强水绿布局优化形成良好的空气流通提高降温效应。河流距河岸距离的阈值是 400m，在离岸 400m 范围内合理组织绿地空间，将产生最大降温协同影响；400m 以外研究缓冲区域，应注重蓝绿网络结构因子引导，尤其绿色廊道空间可达河流，以及布局延伸连通蓝绿空间之间的绿色廊道，以河流蓝带网络为骨架将带状绿地、公园、林地等绿地开放空间相互连接形成生态网络景观格局，促进滨水城市大范围的协同冷岛效应。

4 结论

本研究根据选取的上海市研究区滨水绿地地表温度与蓝绿空间分布数据，分析其缓解城市热岛的影响作用。采用 BRT 模型分析滨水绿地形态构成指标和水绿网络指标对绿地地表温度的贡献比率和边际效应影响作用，最后得出以下结论：

(1) 现状滨水绿地的冷岛效应在城市化不同圈层结构中具有显著差异。中心城区绿地斑块规模小且分布破碎，滨水绿地冷岛效应不明显；近郊区在近些年规划建设影响下，分布着一定数量和规模的生态滨水绿地，滨水绿地系统整体性较好，冷岛效应作用最强；远郊区绿色空间的耕地面积比重较大，该圈层冷岛效应较之近郊区不够理想。

(2) 多维要素共同影响下各空间因子对 LST 的相对贡献程度和边际效应，发现绿地覆盖度、面积、水面率、距河岸距离、景观形状指数、集聚度指数和地表反照率是重要的影响变量。绿地结构形态因子对滨水绿地 LST 分布影响作用大于河流形态因子作用。绿地面积和植被覆盖度对降温影响十分显著，是降温主导因素。其次是水面率和距河岸距离，对 LST 影响较大。

(3) 空间各结构形态因子的降温边际效应影响，存在一定的指标阈值。绿地覆盖度在达到 0.3 以及大于 0.3 开始产生负向影响作用；绿地面积的冷岛效应在 50ha 处达到边际效应阈值影响；景观形状指数边际效应阈值为 2，小于 2 的简单绿地斑块与 LST 正向影响规律明显；地表反照率的降温强度最大阈值出现在 0.16，在 0.16~0.19 之间会产生明显负向影响。水面率越大，对滨水绿地降温作用越强，其边际阈值影响在 0.11 处。水体和绿地协同降温效应在 400m 达到边际阈值影响。对于生态斑块集聚程度来说，集聚度指数大于 75 时，对 LST 开始产生显著负向降温影响。

蓝绿协同降温效应是一个综合复杂的生态过程。前期的研究侧重于空间单因子的降温影响作用，缺少多维度空间指标的降温协同作用。蓝绿协同降温效应研究处于起步阶段。本研究区域是城市分区尺度，滨河蓝绿空间降温作用十分复杂。本研究在研究方法上有所创新。数据来源基于高精度谷歌卫星地图进行人工解译并进行矢量化电子地图配准，绿地分布格局具有较高精度的优点^[61]。采用 BRT 机器学习方法量化分析多个空间因子共同影响下的各要素对 LST 的重要影响程度和边际效应阈值，一定程度上提供了优化空间关联研究的新方法。

参考文献:

- [1] OKE T R. The energetic basic of the urban heat island[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1982, 108(455):1-24.
- [2] VOOGT J A, OKE T R. Thermal remote sensing of urban climates[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 86, 370-384.
- [3] SKELHORN C, LINDLEY S, LEVERMORE G. The impact of vegetation types on air and surface temperatures in a temperate city: A fine scale assessment in Manchester, UK[J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 121:129-140.
- [4] AFLAKI A, MIRNEZHAD M, GHAFARIANHOSEINI A, et al. Urban heat island mitigation strategies: A state-of-the-art review on Kuala Lumpur, Singapore and Hong Kong[J]. Cities, 2016, 62:131-145.
- [5] TALLIS M, TAYLOR G, SINNETT D, et al. Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments[J]. Landscape and Urban Planning, 2011, 103(2): 129-138.
- [6] TAHA H. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat[J]. Energy & Buildings, 1997, 25(2):99-103.
- [7] CHEN A, LEI Y, SUN R, et al. How many metrics are required to identify the effects of the landscape pattern on land surface temperature?[J]. Ecological Indicators, 2014, 45(1):424-433.
- [8] KONG F, YIN H, WANG C, et al. A satellite image-based analysis of factors contributing to the green-space cool island intensity on a city scale[J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2014, 13(4):846-853.
- [9] WANG Y, ZHAN Q, OUANG W. How to quantify the relationship between spatial distribution of urban waterbodies and land surface temperature?[J]. Science of The Total Environment, 2019, 671:1-9.
- [10] CAI Z, HAN G, CHEN M. Do water bodies play an important role in the relationship between urban form and land surface temperature?[J]. Sustainable Cities and Society, 2018, 39:487-498.
- [11] YU Z, YANG G, ZUO S, et al. Critical review on the cooling effect of urban blue-green space: A threshold-size perspective[J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2020, 49:126630.
- [12] BOWLER D E, BUYUNG-ALI L, KNIGHT T M, et al. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence[J]. Landscape and Urban Planning, 2010, 97(3):147-155.
- [13] YU Z, FAN H, YANG G, et al. How to cool hot-humid(Asian) cities with urban trees? An optimal landscape size perspective[J]. Agricultural and Forest Meteorology. 2019, 265:338-348.
- [14] LIN B S, LIN Y J. Cooling effect of shade trees with different characteristics in a subtropical urban

park[J]. HortScience, 2010, 45(1):83-86.

[15]SKOULIKA F, SANTAMOURIS M, KOLOKOTSA D, et al. On the thermal characteristics and the mitigation potential of a medium size urban park in Athens, Greece[J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 123(3):73-86.

[16]YU Z, GUO X, JØRGENSEN G, et al. How can urban green spaces be planned for climate adaptation in subtropical cities?[J]. Ecological Indicators, 2017, 82:152-162.

[17]MONTEIRO M V, DOICK K J, HANDLEY P, et al. The impact of greenspace size on the extent of local nocturnal air temperature cooling in London[J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2016, 16:160-169.

[18]花利忠, 孙凤琴, 陈娇娜, 等. 基于 Landsat-8 影像的沿海城市公园冷岛效应——以厦门为例[J]. 生态学报, 2020, 40(22):8147-8157.

[19]YANG G, YU Z W, JRGENSEN G, et al. How can urban blue-green space be planned for climate adaption in high-latitude cities? A seasonal perspective[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 53:101932.

[20]SUN R, CHEN L. How can urban water bodies be designed for climate adaptation?[J]. Landscape and Urban Planning, 2012, 105(1-2):27-33.

[21]XIN C, ONISHI A, CHEN J, et al. Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data[J]. Landscape and Urban Planning, 2010, 96(4):224-231.

[22]FIROZJAEI M K, SEDIGHI A, FIROZJAEI H K, et al. A historical and future impact assessment of mining activities on surface biophysical characteristics change: A remote sensing-based approach[J]. Ecological Indicators, 2021, 122:107264.

[23]SEKERTEKIN A, ZADBAGHER E. Simulation of future land surface temperature distribution and evaluating surface urban heat island based on impervious surface area[J]. Ecological Indicators, 2021, 122:107230.

[24]李延明, 徐佳, 张济和, 等. 城市绿化对北京城市热岛效应的缓解作用[J]. 北京园林, 2002(4):12-16.

[25]WANG Y J, YAN F, ZHANG P Q, et al. Study on urban heat island changes in Beijing using normalized difference vegetation index and Albedo Data[J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(2):215-220.

[26]SHIH W. Greenspace patterns and the mitigation of land surface temperature in Taipei metropolis[J]. Habitat International, 2017, 60:69-80.

[27]MASOUDI M, TAN P Y. Multi-year comparison of the effects of spatial pattern of urban green spaces on urban land surface temperature[J]. Landscape and Urban Planning, 2019, 184:44-58.

[28]WEBB B W, ZHANG Y. Spatial and seasonal variability in the components of the river heat budget[J]. Hydrological processes, 1997, 11(1):79-101.

-
- [29] XUE Z, HOU G, ZHANG Z, et al. Quantifying the cooling-effects of urban and peri-urban Wetlands using remote sensing Data: Case study of cities of Northeast China[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 182:92-100.
- [30] MURAKAWA S, SEKINE T, NARITA KI, et al. Study of the effects of a river on the thermal environment in an urban area[J]. *Energy and buildings*, 1991, 16(3/4):993-1001.
- [31] WU J, LI C, ZHANG X, et al. Seasonal variations and main influencing factors of the water cooling islands effect in Shenzhen[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 117:106699.
- [32] SUN R, CHEN A, CHEN L, et al. Cooling effects of wetlands in an urban region: The case of Beijing[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 20:57-64.
- [33] 司徒艳娜. 广州市城市水体的热环境效应研究[D]. 广州: 中山大学, 2017.
- [34] 岳文泽, 徐丽华. 城市典型水域景观的热环境效应[J]. *生态学报*, 2013, 33(6):1852-1859.
- [35] LI J, SONG L, CHAO L, et al. How do urban spatial patterns influence the river cooling effect? A case study of the Huangpu riverfront in Shanghai, China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 69:102835
- [36] LIN Y, WANG Z, JIM C Y, et al. Water as an urban heat sink: Blue infrastructure alleviates urban heat island effect in mega-city agglomeration[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 262:121411.
- [37] LI J, SONG L, CHAO L, et al. How do urban spatial patterns influence the river cooling effect? A case study of the Huangpu Riverfront in Shanghai, China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 69:102835
- [38] 黄焕春. 城市热岛的形成演化机制与规划对策研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [39] ROBITU M, MUSY M, INARD C, et al. Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate[J]. *Solar Energy*, 2016, 80(4):435-447.
- [40] JIANG Y, SONG D, SHI T, et al. Adaptive analysis of green space network planning for the cooling effect of residential blocks in summer: A case study in Shanghai[J]. *Sustainability*, 2018, 10(9):3189.
- [41] JIANG Y, JIANG S, SHI T. Comparative study on the cooling effects of green space patterns in waterfront build-up blocks: An Experience from Shanghai[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(22):8684.
- [42] 上海市水务局(上海市海洋局). 2019 上海市河道(湖泊)报告[R/OL]. <http://swj.sh.gov.cn/hhbg/20200909/8f8b475a016f4f58b826c8ac2443657a.html>
- [43] 浙江质量监督局. 河道建设规范: DB33/T 614-2016[S]. 2016. DB33/T 614-2016.
- [44] 滕明君. 快速城市化地区生态安全格局构建研究——以武汉市为例[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.

-
- [45] PUREVDORJ T, TATEISHI R, ISHIYAMA T, et al. Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(18):3519–3535.
- [46] GITELSON A A, KAUFMAN Y J, STARK R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(1):76–87.
- [47] CAO X, ONISHI A, CHEN J, et al. Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data[J]. *Landscape and urban planning*, 2010, 96(4):224–231.
- [48] WANG S, GRANT R F, VERSEGHY D L, et al. Modeling carbon dynamics of boreal forest ecosystems using the Canadian land surface scheme[J]. *Climatic Change*, 55(4), 2002:451–477.
- [49] ROBERT E, DICKINSON. Land processes in climate models[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51:27–38.
- [50] LIANG S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo i algorithms[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(2):213–238.
- [51] 赵凌栋, 车丁, 张晶, 等. 基于景观指数的高邮湖湿地生态水文连通性分析[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(1):130–137.
- [52] 刘文博, 宋文杰, 石林, 等. 长株潭地区水域现状及水面率需求分析[J]. *湖南水利水电*, 2020(1):46–49.
- [53] KATZ J S. Geographical proximity and scientific collaboration[J]. *Scientometrics*, 1994, 31(1):31–43.
- [54] JIMÉNEZ-MUÑOZ J C, CRISTÓBAL J, SOBRINO J A, et al. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data[J]. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 2008, 47(1):339–349.
- [55] YU X, GUO X, WU Z. Land surface temperature retrieval from landsat 8 TIRS-Comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(10):9829–9852.
- [56] ELITH J, LEATHWICK J R, HASTIE T. A working guide to boosted regression trees[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2008, 77(4):802–813.
- [57] 陈蕾, 郭熙, 韩逸, 等. 基于BRT模型的南昌市城市扩展时空特征及驱动因素研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2020(2):322–333.
- [58] GRUNWALD L, SCHNEIDER A K, SCHRDER, B, et al. Predicting urban cold-air paths using boosted regression trees[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 201:103843.
- [59] HU Y, DAI Z, GULDMANN J M. Modeling the impact of 2D/3D urban indicators on the urban heat island over different seasons:A boosted regression tree approach[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 266:110424.

[60]刘照,王立国,王屏.农户参与森林碳汇经营管理意愿的影响因素分析——基于增强回归树(BRT)模型的实证研究[J].江西林业科技,2018,46(6):22-28.

[61]KONG F,YIN H,JAMES P,et al.Effects of spatial pattern of greenspace on urban cooling in a large metropolitan area of eastern China[J].Landscape and Urban Planning,2014,128:35-47.