

朱雯,王敏.基于遥感反演的江南水网地区城镇蓝绿空间格局对夏季降温的影响与尺度效应分析[J].华中农业大学学报,2023,42(4):86-97.DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.04.010

基于遥感反演的江南水网地区城镇蓝绿空间格局 对夏季降温的影响与尺度效应分析

朱雯^{1,2},王敏^{1,3}

1. 高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室(同济大学)水绿生态智能分实验中心,上海 200092;
2. 广州市城市规划勘测设计研究院,广州 510030; 3. 同济大学建筑与城市规划学院,上海 200092

摘要 为探索提升江南水网地区城镇蓝绿空间格局降温效应的空间尺度差异性,提升城镇蓝绿空间的降温效应。以昆山市为例,利用遥感数据和辐射传输方程法进行地表温度反演,在市域和城区2个尺度下分别构建城镇蓝绿空间格局与夏季降温效应度量指标的相关性分析与增强回归树模型,揭示了江南水网地区影响夏季降温效应的城镇蓝绿空间格局关键因子及重要性排序,并对比研究其降温效应的空间尺度差异性。结果显示:市域尺度下,蓝绿空间格局对夏季最高地表温度影响的相对贡献率高于10%的指标有4个,影响程度依次为:水体形状指数>蓝绿空间占比>滨水绿地宽度>水体聚集度;蓝绿空间格局对冷岛强度影响的相对贡献率高于10%的指标有3个,影响程度依次为:滨水绿地宽度>水体形状指数>蓝绿空间占比。城区尺度下,蓝绿空间格局对夏季最高地表温度影响的相对贡献率高于10%的指标有5个,影响程度依次为:水体聚集度>水体平均斑块面积指数>绿地率>水面率>水体形状指数;蓝绿空间格局对冷岛强度影响的相对贡献率高于10%的指标有2个,影响程度为:绿地聚集度>蓝绿空间占比。研究表明,蓝绿空间格局特征与夏季降温的相关程度和贡献率水平均具有显著的尺度效应。

关键词 蓝绿空间;降温效应;空间格局;地表温度反演;尺度效应

中图分类号 TU985 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)04-0086-12

气候变化正深刻影响着全球政治、经济与社会环境安全。世界经济论坛最新发布的《2022年全球风险报告》将应对气候行动失败、极端天气事件列入未来10 a内最紧要的全球十大风险。城镇人口的快速增长、不透水面增加和温室气体大量排放造成城镇气候的显著变化,导致夏季热岛效应逐渐加剧,极端高温事件的频率、强度和持续时间显著增加,严重影响居民健康和城市整体环境质量^[1]。城镇蓝绿空间作为城镇生态系统和人居环境的重要组成部分,承载着多种发挥降温作用的生态过程,其系统性、多样性和连通性在很大程度上受人类活动影响,相比改造地表材料,更具备成本效益、生态友好性和可操作性^[2]。在国土空间强调蓝绿统筹营建的背景下,在各种利益冲突下的需求博弈中,蓝绿空间格局和配置优化成为城市应对气候环境问题的重要途径,有

利于构建组分镶嵌、结构融合、功能互补、服务协同的高质量人居空间体系。

城镇蓝绿空间是指城镇中由园林绿地、城市森林、立体绿化、都市农田和水域湿地等构成的网络系统,是城镇空间的重要组成部分^[3],具有较强的降温效应。其中,绿地的降温功能来源于植被的蒸腾和遮蔽,对太阳辐射的选择性吸收与反射^[4];水体由于具有高热容量、高热惯性和低热传导率,是城镇日间降温的重要因素,此外水体通过蒸发、蒸散和形成通风廊道、促进空气流动也起到降温作用^[5]。尺度特征是指在某一特定的尺度上,各个要素的排列组合方式呈现出特殊性的格局,景观格局、生态过程及其相互关系的研究都依赖于一定的研究尺度,而尺度效应是指不同尺度下的景观格局、生态过程会发生较大的变化,具有明显的尺度依赖性^[6]。

收稿日期:2022-10-27

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52178053)

朱雯,E-mail:15301891151@163.com

通信作者:王敏,E-mail:wmin@tongji.edu.cn

目前国内外关于绿地或者水体降温效应的定性及定量研究较多,笔者梳理现有文献的研究尺度发现,城市层面的研究更关注蓝绿空间的规模特征,街区尺度的研究则纳入较多分布和形状特征因子,更小尺度的研究还涉及到绿廊连通性、天空视域因子、植被表面反照率等因子^[7],但对不同尺度空间的差异性和对比研究较少。此外,由于城镇蓝绿空间特征与降温效应之间并非线性相关,既有研究中常用的参数回归等方法难以准确揭示其中的影响规律^[8],而增强回归树模型能够解决复杂的非线性问题,且具有准确性高、灵活性和稳定性强等特点,已在城市扩张^[9]、流域水体污染^[10]、大气污染^[11]、城市热岛效应^[12]等研究中加以应用。

基于此,本研究关注城镇蓝绿空间的“量(规模)、构(分布)、形(形状)”及其相互关系等空间格局特征对地表温度的影响,以江苏省昆山市为例,运用增强回归树模型展开实证研究,旨在量化揭示江南水网地区影响城镇夏季降温效应的蓝绿空间格局关键因子和相对贡献率。由于热环境具有尺度依赖性,为了将研究成果应用于国土空间规划气候适应性的上下级联动,研究同时在市域和城区2个尺度展开,通过对比城镇蓝绿空间格局夏季降温效应的空间尺度差异性,为不同尺度下营造城镇人居环境提供实践参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域与研究尺度

研究区域江苏省昆山市位于太湖和上海河口冲

积平原之间,是典型的江南水网城市,具体针对昆山市的蓝绿空间开展研究。昆山市河流密布、塘浦纵横、蓝绿交织,全市现有湖泊38个,各级河道2 815条、总长超过2 800 km,丰富的蓝绿空间格局为本研究提供良好的基础条件。

为考察江南水网地区蓝绿空间格局对夏季降温的影响规律与尺度效应特征,本研究分别在市域和城区2个尺度下进行数据采集和分析。其一,市域尺度的研究范围是昆山市市域范围,总面积931.51 km²,其中,蓝绿空间面积共526.9 km²,占总面积的56.56%。为便于数据采集、城镇蓝绿空间特征测算和后续规划传导以及落实蓝绿空间优化内容,本研究依据《昆山市城市总体规划(2016—2035)》中的控规单元边界,并在该研究尺度划分形成71个研究单元,平均规模为13.15 km²(图1),其中,图1的底图来源于国家标准地图服务系统(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>)的苏州政区图,审图号苏S(2021)024号。其二,城区尺度关注集中建设的高密度城区,选取9个城镇综合控规单元作为研究范围,总面积为110.1 km²,其中蓝绿空间面积共42.09 km²,占总面积的38.23%。该研究范围包含河流、湖泊、不同尺度的面状绿地、沿道路和河流的带状绿地,以及广泛分布的点状附属绿地,在功能不同的组团内形成丰富的蓝绿空间分布。在控规单元划分基础上,进一步细分形成50个组团单元作为研究单元,平均规模为2.18 km²(图1B)。

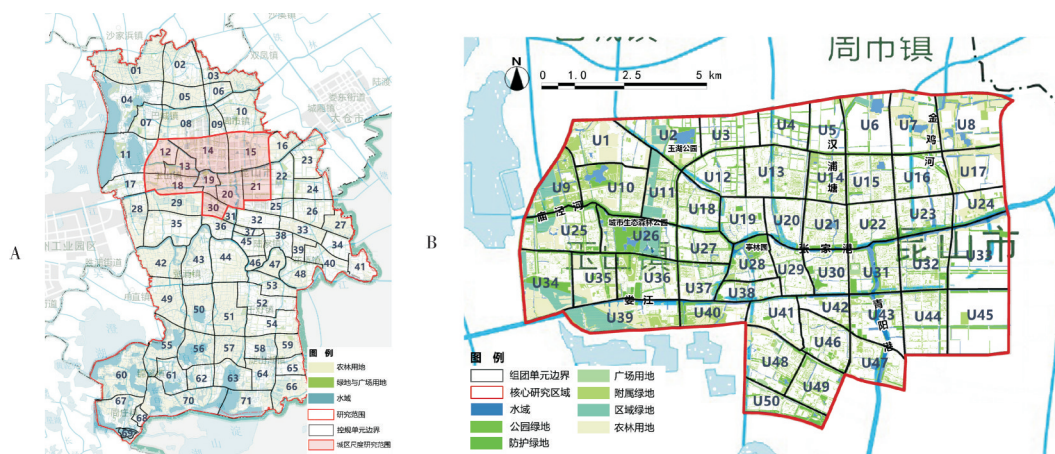


图1 市域尺度(A)和城区尺度(B)的研究范围、蓝绿空间分布与研究单元划分

Fig.1 Research scope, blue-green spatial distribution and division of research units at city scale(A) and urban scale(B)

1.2 研究数据采集

研究所需数据包括基础地理信息数据、气象数据和绿地水体数据3部分,数据来源包括:(1)2021年8月26日10:30的Landsat 8 OLI_TIRS卫星遥感数据,源自地理空间数据云;(2)2021年8月26日10:30国家气象信息中心的1 km气象实况网格数据,用于可靠性验证;(3)研究范围内的绿地和水体分布,来源为相关部门提供的土地利用数据,本研究结合遥感解译和卫星图进行小微绿地的补充和修正;(4)其余数据均由昆山市相关部门提供及实地踏勘获得。

1.3 研究方法

研究的基本思路是契合国土空间规划的上下级

联动需求,在市域和城区2个尺度揭示并比较作为解释变量的城镇蓝绿空间格局与作为响应变量的夏季降温效应之间的关系。其主要步骤包括:(1)基于土地利用数据,利用Fragstats和ArcGIS工具分析得到市域尺度和城区尺度的蓝绿空间格局特征;(2)收集卫星遥感数据、利用辐射传输方程法获取不同尺度下的地表温度,并计算降温效应度量指标;(3)利用相关性分析筛选出不同尺度下具有显著影响特征的因子,将其带入增强回归树模型,确定各因子的相对贡献率;(4)通过对比研究,总结归纳蓝绿空间格局影响夏季降温的尺度效应,并提出规划设计优化策略(图2)。

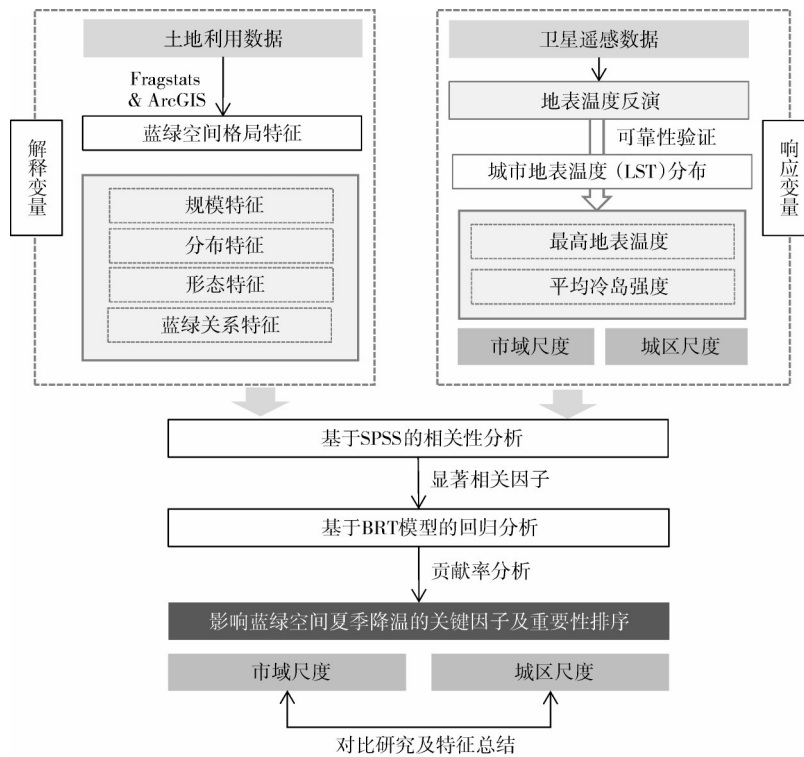


图2 技术路径示意图

Fig.2 Technical path diagram

1)蓝绿空间格局指标选取与测算方法。蓝绿空间的景观组成、空间形态、空间位置和邻接关系对热环境存在较大影响^[6],研究分别从规模特征、分布特征、形状特征和蓝绿关系4个维度遴选出与地表温度相关性较高的8个绿地格局特征、8个水体格局特征和4个蓝绿关系特征,构成研究的指标体系(表1)。

2)夏季降温效应度量指标与测算方法。研究选取平均冷岛强度和最高地表温度双指标对城市夏季降温进行度量,前者量化各尺度单元内蓝绿空间的整体降温效应,后者分析蓝绿空间对局部高温的缓

解能力。其中平均冷岛强度的计算公式^[21]为:

$$I_{UC, mean} = \Delta T_{mean} = \bar{T} - \bar{T}_i (\Delta T \leq 0) \quad (1)$$

其中, $\bar{T} = \sum_1^n T_i / n$ 为研究区域内的平均温度, \bar{T}_i 是第 i 个单元的平均温度。

目前,城镇热环境的测度方法主要包括3种,其中,地面气象观测技术主要应用于若干定点的热环境研究;热红外遥感技术主要应用于分析空间尺度较大的地表温度情况,获取的数据具有连续性、完整性和实时性;而数值模拟技术主要应用于高精度、小范围内的研究^[22]。常见的热红外遥感数据中,

表1 蓝绿空间格局指标
Table 1 Blue-green spatial pattern index

变量类别 Variable class	指标 Index	计算方式 Formula mode	指标描述 Indicator description
规模特征 Scale characteristics	斑块所占景观面积比例 ^[13] PLAND(P_{LAND})	$P_{LAND} = P_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{i,j}}{A_i} \times 100$ 其中, A_i 为研究单元 i 的面积, m^2 ; $a_{i,j}$ 为单元 i 中斑块 j 的面积, m^2 。	量化空间单元中各类斑块类型的丰度比例。具体分为绿地斑块所占景观面积比、水体斑块所占景观面积比计算。
	最大斑块面积指数 ^[13] LPI(I_{LP})	$I_{LP} = \frac{a_{i,j}(\max)}{A_i} \times 100$ 其中, $a_{i,j}(\max)$ 为研究单元 i 中的最大斑块 j 的面积, m^2 ; A_i 为研究单元 i 的面积, m^2 。	衡量空间单元中最大的斑块规模。具体分为绿地最大斑块面积指数、水体最大斑块面积指数计算。
	平均斑块面积指数 ^[14] MPI(I_{MP})	$I_{MP} = \frac{\sum_{j=1}^n a_{i,j}}{nA_i} \times 100$ 其中, n 为空间单元 i 中斑块个数; $a_{i,j}$ 为单元 i 中斑块 j 的面积, m^2 ; A_i 为研究单元 i 的面积, m^2 。	衡量空间单元中斑块的平均规模, 具体分为绿地平均斑块面积指数、水体平均斑块面积指数计算。
分布特征 Distribution characteristics	斑块密度 ^[15] PD(D_p)	$D_p = \frac{n_i}{A_i} \times 10000$ 其中, n_i 为空间单元 i 中斑块个数; A_i 为研究单元 i 的面积, m^2 。	单位面积内某种斑块的个数, 能够反映某种斑块在建成环境中分布的密集程度, 具体分为绿地斑块密度、水体斑块密度计算。
	整体连接度 ^[14] CONNECT(C)	$C = \frac{\sum_{j \neq k} c_{j,k}}{n_i(n_i - 1)/2} \times 100$ 其中, n_i 为空间单元 i 中斑块个数; $c_{j,k}$ 表示斑块 j 和斑块 k 之间的连接。	衡量蓝绿空间网络连接性的指标, 具体分为绿地整体连接度、水体整体连接度计算。
	聚集度指数 ^[16] AI(I_A)	$IA = \left[\frac{g_{i,i}}{\max \rightarrow g_{i,i}} \right]$ 其中, $g_{i,i}$ 为斑块类型的相似邻接斑块数量; $\max \rightarrow g_{i,i}$ 为斑块类型的最大可能相似邻接斑块数量。	衡量空间单元中景观类型斑块间的连通性, 具体分为绿地聚集度指数、水体聚集度指数计算。
形状特征 Shape characteristics	外切圆指数 ^[14] RCC(R_{CC})	$R_{CC} = \frac{\sum_{j=1}^n \left(1 - \frac{a_{i,j}}{a_{i,j}^S} \right)}{n}$ 其中, n 是空间单元 i 中某种斑块个数; $a_{i,j}$ 是空间单元 i 中斑块 j 的面积, m^2 ; $a_{i,j}^S$ 为空间单元 i 中斑块 j 的最小外切圆面积, m^2 。	等于1减去其面积与其最小外切圆面积的比值, 能够表征斑块的线性程度, 具体分为绿地外切圆指数、水体外切圆指数计算。
	形状指数 ^[16] LSI(I_{LS})	$I_{LS} = 0.25E_{i,j} / \sqrt{a_{i,j}}$ 其中, $E_{i,j}$ 为单元 i 中斑块 j 的总长度, m ; $a_{i,j}$ 为单元 i 中斑块 j 的总面积, m^2 。	通过计算某一斑块形状与相同面积的圆或正方形之间的偏离程度来反映空间单元中斑块的变异性, 具体分为绿地形状指数、水体形状指数计算。
蓝绿关系 Blue-green relation	蓝绿面积比 ^[19] $A_{R,gw}$	$A_{R,gw} = a_{i,g} / a_{i,w}$ 其中, $a_{i,g}$ 为空间单元 i 中绿地斑块总面积, m^2 ; $a_{i,w}$ 为空间单元 i 中水体总面积, m^2 。	衡量空间单元中绿地面积与水体面积的比值。
	蓝绿空间占比 ^[17] $P_{g,w}$	$P_{g,w} = \frac{\sum_{j=1}^n a_{i,g,j} + \sum_{k=1}^m a_{i,w,k}}{A_i} \times 100$ 其中, $a_{i,g,j}$ 为空间单元 i 中绿地斑块 j 的面积, m^2 ; $a_{i,w,k}$ 为空间单元 i 中水体斑块 k 的面积, m^2 ; A_i 为空间单元 i 的总面积, m^2 。	衡量空间单元中生态空间的总占比。
	蓝绿融合度 ^[18] $I_{g,w}$	$I_{g,w} = A_{g,w30} / A_{w30}$ 其中, $A_{g,w30}$ 为水系两岸各 30 m 范围内的绿地面积, m^2 ; A_{w30} 为水系两岸 30 m 范围的总面积, m^2 。	衡量城市水生生态系统和陆生生态系统的衔接和过渡。
	滨水绿地平均宽度 ^[20] $W_{g,w}$	$W_{g,w} = A_{g,w} / L_w$ 其中, $A_{g,w}$ 是研究单元 i 中与水体相邻的绿地面积, m^2 ; L_w 是研究单元 i 中水体总长度, m 。	表征滨水绿地规模特征和滨水绿线控制水平。

注: 规模特征、分布特征和形状特征均分为绿地格局指数和水体格局指数分别计算。Note: The scale characteristics, distribution characteristics and shape characteristics were divided into green space pattern index and water pattern index.

Landsat 8精度最高,可达30 m。地表温度反演是分析热红外遥感技术的主要方式,包括单波段、双波段和多波段算法,其中单波段算法较适合Landsat 8数据,相关研究表明单波段算法中辐射传输方程法的精度相对较高^[23]。因此,本研究选取辐射传输方程法,对Landsat 8 OLI_TIRS数据进行地表温度反演,获得城市地表温度。

辐射传输方程法又称大气校正法,其主要依据为普朗克辐射函数公式,它准确描述了物体热辐射亮度、波长与温度之间的关系。地表温度可以根据普朗克反函数公式计算:

$$T_s = K_2 / \ln[K_1 / B(T_s) + 1] \quad (2)$$

式(2)中, K_1 和 K_2 为辐射常数,对于Landsat 8 TIRS10, K_1 等于774.89, K_2 等于1 321.08; $B(T_s)$ 为黑体在热红外波段的辐射亮度,其计算公式为:

$$B(T_s) = [L_\lambda - L_\uparrow - \tau(1 - \epsilon)L_\downarrow] / (\tau\epsilon) \quad (3)$$

式(3)中, L_λ 为热红外辐射亮度值, L_\downarrow 为大气下行辐射, L_\uparrow 为大气上行辐射, ϵ 为地表比辐射率, τ 为大气在热红外波段的透过率。在ENVI 5.3中将遥感影像分为水体、自然表面和城镇3种类型,分别计算其 ϵ 值。在NASA官网的大气校正参数计算器中输入成影时间2021年8月26日10:30,数据类型Landsat 8 OLI_TIRS,中心经度120.399 5°,中心纬度31.738 2°,计算得到 τ 为0.50, L_\uparrow 为4.15 W/(m²·sr·μm), L_\downarrow 为6.23 W/(m²·sr·μm)。

3)相关性分析与增强回归树模型构建。研究以20个蓝绿空间格局表征因子(包括8个绿地格局特征、8个水体格局特征和4个蓝绿关系特征)为自变量,以最高地表温度和平均冷岛强度为因变量进行相关性分析和模型构建。主要包括4个步骤:(1)采用非参数检验的K-S检验判断变量是否符合正态分布;(2)对20个蓝绿空间格局指标与2个热环境度量指标进行两两相关性检验,符合正态分布的数据采用Pearson相关性分析,不符合的采用Spearman相关性分析;(3)为保证解释变量不冗余,使回归模型有参考意义,通过共线性诊断检验各因子间的相互独立性;(4)增强回归树(BRT)模型分析。BRT模型结合统计学和回归树算法的优势,通过对数据集的多次重复随机选择和交叉验证来生成多元回归树,有助于提高预测精度^[24]。研究运用BRT模型分析蓝绿空间格局指标对城镇夏季降温的相对贡献率,获得各指标的重要性排序。

2 结果与分析

2.1 多尺度下的蓝绿空间格局特征

1)市域尺度下的蓝绿空间格局特征。通过Fragstats和ArcGIS对蓝绿空间格局特征指标进行计算,可知各研究单元的蓝绿空间格局特征差异较大。从蓝绿空间的规模来看,市域尺度下各单元绿地率为12.55%~93.42%,水面率为1.39%~53.81%,单元间呈现明显差异;绿地的平均斑块面积指数和最大斑块面积指数均呈现南北两端较高、中部较低的特征;水体斑块规模比绿地大,整体呈现西高东低的特征,其中西南部水体斑块面积最大。分析蓝绿空间的分布特征,发现高密度城区的蓝绿斑块密度高,但较为分散破碎、连通性较低。从蓝绿空间的形状特征来看,高密度城区的蓝绿空间形状较为复杂,高密度城区外的绿地更接近线型,而南北两端及东部的单元内水体更接近线型。各单元间的蓝绿关系特征差异较大,蓝绿面积比西侧较大,东侧水面逐渐减少,绿地占比较大;蓝绿总占比呈现西高东低、南高北低的特征;南部和西北部单元的蓝绿融合度较高,东部单元较低;滨水绿地平均宽度为7.3~729.0 m,空间分布呈现东部滨水绿地较宽,中部高密度城区的滨水绿地相对较窄。

2)城区尺度下的蓝绿空间格局特征。在城区尺度下对研究范围内各组团单元的蓝绿空间格局特征进行分析,可知:规模特征方面,各单元绿地率为7.97%~62.13%,水面率为4.57%~24.85%,单元间差异较大,空间分布上呈现西南和东北部的绿地率较高,西北和东南部的的水面率较高;各单元的绿地最大斑块面积指数、蓝绿平均斑块面积指数差异性均较大,其中西南部单元的绿地最大斑块面积指数较高;绿地平均斑块面积指数远低于水体。分布特征中,绿地斑块密度远高于水体,绿地斑块密度呈现中部个别单元高、四周低的特征,中部单元绿地较为分散,靠近四周的单元连通性较高;水体连通性呈现西南、南部较大的特征,汉浦塘、青阳港和娄江流经单元及西南部农田水系的连通性较高,玉湖公园、娄江和青阳港所在单元的水体聚合度较高。从形状指标来看,中部单元的绿地边缘较为复杂,而东部和北部单元内的绿地较接近线型;西侧单元水体的形状较东侧更加曲折自然,中部和北部单元的水体更接近线型。蓝绿关系方面,绿地占比更高的单元集中分布在中部区域,单元内河流狭窄,但附属绿地丰富;西侧的蓝绿空间相较东侧更加丰富;西部和东北部

单元的蓝绿融合度较高,滨水绿地较宽。

2.2 多尺度下的夏季热环境空间分布特征

1)地表温度反演结果可靠性验证。本研究运用国内外相关研究常用的均方根误差(root mean square error, E_{RMS})和平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error, E_{MAP})来验证地表温度反演结果的可靠性。 E_{RMS} 和 E_{MAP} 能够反映反演值偏离实测值的程度,二者的值越小,代表反演的精度越高。

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y'_i - y_i)^2} \quad (4)$$

$$E_{MPA} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y'_i - y_i|}{y_i}} \times 100\% \quad (5)$$

式(4)、(5)中, y'_i 为反演值, y_i 为实测值, n 为样本数量。对比昆山市高密度城区气象实况网格数据与

根据地表温度反演结果推算的空气温度,辐射传输方程法反演结果的 E_{RMS} 为 $0.84\text{ }^{\circ}\text{C}$ (小于 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$), E_{MAP} 为 3.86% (小于 5%),说明实测值和反演的结果误差较小,反演结果能较好地反映城市热环境。

2)市域尺度热环境总体特征。根据反演结果,昆山市市域尺度的地表温度分布整体呈现北高南低的特征,集中建成区内地表温度较高,南部水乡片区较低(图3)。地表温度范围为 $10.24\sim 55.19\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均地表温度为 $29.64\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对各控规单元的最高地表温度进行统计,可知其平均值为 $40.97\text{ }^{\circ}\text{C}$,高密度城区周边的工业园和产业园的最高地表温度较其中心更高。各单元的平均冷岛强度分布在 $-9.07\sim 10.29\text{ }^{\circ}\text{C}$,南部澄湖与淀山湖周边的低温区更加明显,北部东西两翼的冷岛强度较高。

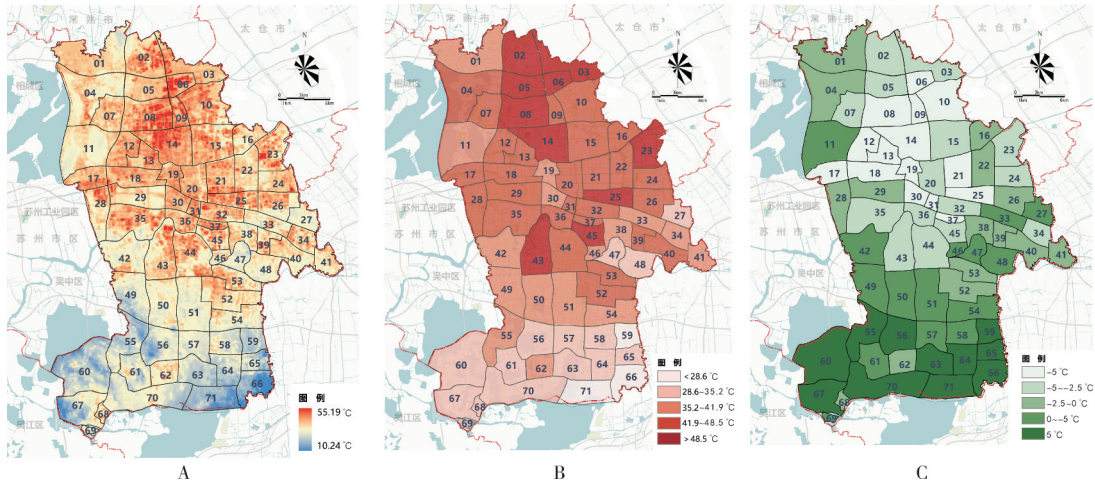


图3 市域尺度整体地表温度(A)、最高地表温度(B)、平均冷岛强度(C)分布图

Fig.3 Distribution of global surface temperature (A), maximum surface temperature (B) and mean cold island intensity (C) at city scale

3)城区尺度热环境总体特征。城区尺度研究范围内的地表温度介于 $21.29\sim 52.94\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均值为 $33.64\text{ }^{\circ}\text{C}$,较市域尺度下整体地表温度高 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$,空间分布呈现中北部温度高、东部低的特征。对各组团单元的地表温度最大值进行统计,可知地表温度呈现北高南低的特征,最高地温较大的单元集中在正北部的工业园、产业园内。各组团单元的冷岛强度平均值为 $-0.11\text{ }^{\circ}\text{C}$,分布范围为 $-6.23\sim 3.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,共有29个组团单元的冷岛强度值为正,空间分布呈现东部和南部单元冷岛强度高的特征(图4)。

2.3 城镇蓝绿空间格局与夏季降温的相关性

对比市域和城区2个尺度下昆山市蓝绿空间规模特征与城市热环境的相关性分析结果(表2)可知:市域尺度和城区尺度下绿地规模较水体规模对城镇

热环境的影响更大。其中,绿地平均斑块面积指数在市域尺度对夏季降温的影响较大,水体最大斑块面积指数和平均斑块面积指数在市域尺度下与冷岛强度平均值呈现极显著正相关。

对比2个尺度下蓝绿空间分布特征与城市热环境的相关性分析结果(表3)可知,蓝绿空间分布特征对城市热环境的相关性比蓝绿空间规模特征弱,其中绿地分布指标与市域尺度下的城市热环境相关性较强,但城区尺度下仅绿地聚集度指数与冷岛强度平均值的相关性较强;水体分布指标中仅聚集度指数与地表温度最大值存在显著相关性。

对于2个尺度下蓝绿空间的形状特征与城市热环境的相关性分析结果(表4)可知,绿地形状特征与市域尺度城镇热环境的相关性高,但在城区尺度仅

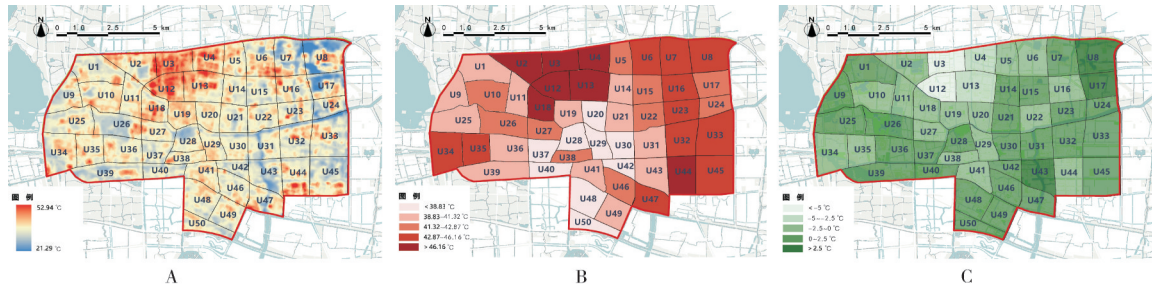


图4 城区尺度整体地表温度(A)、最高地表温度(B)、平均冷岛强度(C)分布图

Fig.4 Distribution of global surface temperature(A), maximum surface temperature(B) and mean cold island intensity(C) at urban scale

表2 蓝绿空间规模特征对城市热环境影响的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of the influence of blue-green spatial scale characteristics on urban thermal environment

蓝绿空间规模指标 Blue-green space scale index	相关系数 Correlation coefficient			
	地表温度最大值 LST_{max}		冷岛强度平均值 UCI_{mean}	
	市域尺度 City scale	城区尺度 Urban scale	市域尺度 City scale	城区尺度 Urban scale
绿地率 PLAND_G	-0.348**	-0.526**	0.454**	0.439**
绿地最大斑块面积指数 LPI_G	-0.439**	-0.364**	0.522**	0.510**
绿地平均斑块面积指数 MPI_G	-0.413**	0.024	0.591**	0.355*
水面率 PLAND_W	-0.317*	-0.315**	0.344**	0.340*
水体最大斑块面积指数 LPI_W	-0.351**	-0.302*	0.363**	0.215
水体平均斑块面积指数 MPI_W	-0.198	-0.126	0.439**	-0.041

注:**表示在0.01水平极显著相关,*表示在0.05水平显著相关。Note:** means significant correlation at level 0.01, * means significant correlation at level 0.05.下同 The same as below.

表3 蓝绿空间分布特征对城市热环境影响的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of the influence of blue-green spatial distribution characteristics on urban thermal environment

蓝绿空间分布指标 Blue-green spatial distribution index	相关系数 Correlation coefficient			
	地表温度最大值 LST_{max}		冷岛强度平均值 UCI_{mean}	
	市域尺度 City scale	城区尺度 Urban scale	市域尺度 City scale	城区尺度 Urban scale
绿地斑块密度 PD_G	0.377**	-0.048	-0.547**	-0.259
绿地整体连接度 CONNECT_G	-0.325**	-0.099	0.386**	0.048
绿地聚集度指数 AI_G	-0.383**	-0.001	0.508**	0.566**
水体斑块密度 PD_W	0.106	-0.107	-0.345**	0.257
水体整体连接度 CONNECT_W	0.009	-0.262	0.118	-0.288*
水体聚集度指数 AI_W	-0.418**	0.317*	0.422**	0.233

表4 蓝绿空间形状特征对城市热环境影响的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of the influence of blue-green spatial shape characteristics on urban thermal environment

蓝绿形状指标 Blue-green shape index	相关系数 Correlation coefficient			
	地表温度最大值 LST_{max}		冷岛强度平均值 UCI_{mean}	
	市域尺度 City scale	城区尺度 Urban scale	市域尺度 City scale	城区尺度 Urban scale
绿地外切圆指数 RCC_G	-0.338**	0.144	0.487**	0.027
绿地形状指数 LSI_G	0.380**	-0.028	-0.454**	-0.393**
水体外切圆指数 RCC_W	-0.061	0.233	0.188	-0.342*
水体形状指数 LSI_W	0.485**	-0.418**	-0.511**	0.052

绿地形状指数与冷岛强度平均值显著负相关；水体形状指数在不同尺度下与地表温度最大值均显著相关,但其相关性相反,在市域尺度下水体边缘越复杂地表温度越高,但在城区尺度下形状越复杂越有利于降温。

对比2个尺度下蓝绿空间关系特征与城市热环境的相关性分析结果(表5)可知,蓝绿面积比与夏

季热环境的相关性较低;而蓝绿空间总占比在不同尺度下与地表温度最大值和冷岛强度平均值均呈极显著相关;蓝绿融合度在市域尺度与热环境指标的相关性较强,在城区尺度较弱;滨水绿地平均宽度在市域尺度与热环境指标极显著相关,在城区尺度下仅与冷岛强度平均值极显著相关,说明在城区尺度下滨水绿地越宽,对整体温度的调控作用越强。

表5 蓝绿关系特征对城市热环境的相关性分析

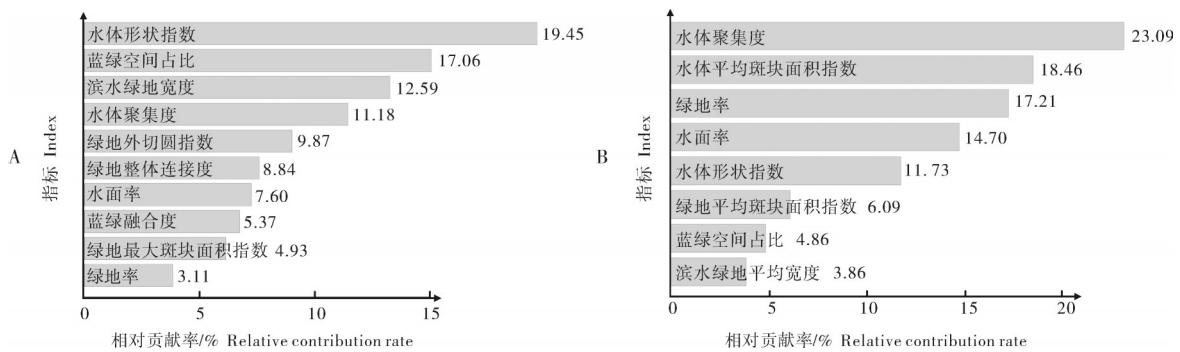
Table 5 Correlation analysis of blue-green relationship characteristics to urban thermal environment

蓝绿关系指标 Blue-green relation index	相关系数 Correlation coefficient			
	地表温度最大值 LST_{max}		冷岛强度平均值 UCI_{mean}	
	市域尺度 City scale	城区尺度 Urban scale	市域尺度 City scale	城区尺度 Urban scale
蓝绿面积比 $A_{R,w}$	-0.028	-0.194	-0.060	0.186
蓝绿空间总占比 $P_{g,w}$	-0.483**	-0.524**	0.593**	0.449**
蓝绿融合度 $I_{g,w}$	-0.312**	-0.253	0.402**	0.243
滨水绿地平均宽度 $W_{g,w}$	-0.446**	-0.181	0.621**	0.412**

2.4 城镇蓝绿空间格局对夏季降温相对贡献率的尺度效应

将显著相关且通过共线性诊断的蓝绿空间格局指标代入增强回归树(BRT)模型分析,结果显示:城镇蓝绿空间格局对于夏季最高地表温度的影响方面,市域尺度下相对贡献率高于10%的有4个指标,根据重要性排序为:水体形状指数>蓝绿空间占比>滨水绿地宽度>水体聚集度;城区尺度下有5个指标的相对贡献率高于10%,其重要性排序为:水体聚集度>水体平均斑块面积指数>绿地率>水面

率>水体形状指数(图5)。城镇蓝绿空间格局对最高地表温度的相对贡献率呈现较强的尺度效应,在2种尺度下水体格局的表现均优于绿地格局,优化水体规模、分布和形状对最高地表温度的缓解更有效。蓝绿关系是市域尺度下的主导因素,水体形状和水体分布次之,绿地形状和分布影响较小;水体规模是城区尺度下的主导因素,相对贡献率总和高于30%,其次是水体分布、绿地规模和水体形状特征,蓝绿关系特征在城区尺度下的相对贡献率较低。



A: 市域尺度 City scale; B: 城区尺度 Urban scale.

图5 城镇蓝绿空间格局影响夏季最高地表温度的相对贡献率

Fig.5 Relative contribution rate of urban blue-green spatial pattern to summer maximum land surface temperature

城镇蓝绿空间格局对于冷岛强度平均值的影响方面,市域尺度下相对贡献率高于10%的蓝绿格局指标有3个,其重要性排序为:滨水绿地平均宽度>水体形状指数>蓝绿空间占比;城区尺度下相对贡献率高的2个主导指标是绿地聚集度和蓝绿空间占

比(图6)。城镇蓝绿空间格局对冷岛强度平均值的相对贡献率呈现较强的尺度效应,蓝绿关系特征对市域尺度下冷岛强度平均值的相对贡献率总和高于40%,而在城区尺度下相对贡献率总和为27.7%,原因可能是高密度城区内绿色空间与蓝色

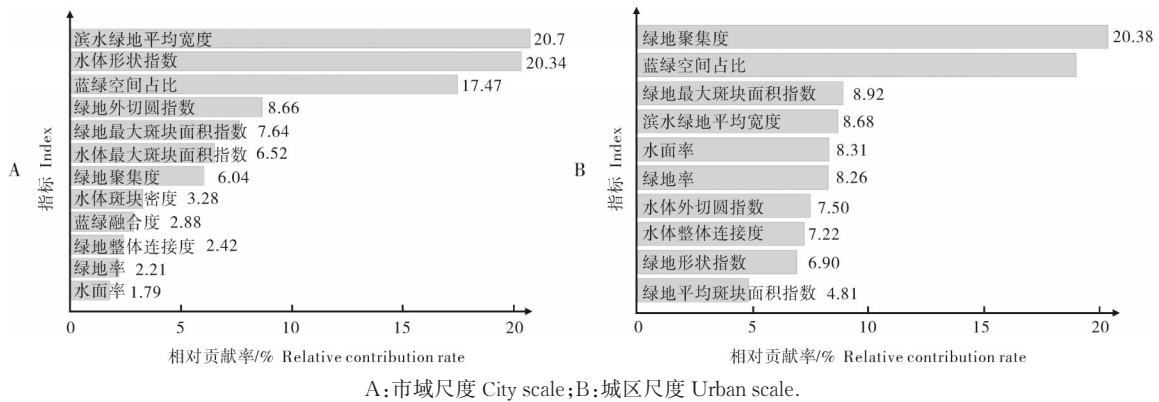


图6 城镇蓝绿空间格局影响夏季平均冷岛强度的相对贡献率

Fig.6 Relative contribution rate of urban blue-green spatial pattern to average cold island intensity in summer

空间的联系不够紧密,城市降温主要依靠合理的绿地布局。

3 讨论

本研究通过遥感反演、增强回归树模型分析相结合的方法,初步探讨了蓝绿空间的规模、分布和形状特征对夏季降温效果的影响规律,明晰各个指标的重要程度,并对市域和城区2个尺度进行对比研究。研究表明,不同尺度的生态空间格局和生态服务存在明显差异,形成生态空间的尺度效应;城市地表热环境与各类地表特征参数的相关性在不同尺度数据中表现的规律具有较大差异性。蓝绿空间关系是市域尺度下能够有效降低局部高温的关键蓝绿空间格局特征,水体形状和水体分布次之,绿地形状和分布特征的相对重要性较弱。水体规模是城区尺度下降低局部高温的主导因素,水体分布、绿地规模和水体形状特征次之,蓝绿空间关系的相对重要性较弱。市域尺度下各类蓝绿空间格局特征均能起到整体降温的效果,其中蓝绿关系最重要,其相对贡献率总和高达40%,其次是水体形状和蓝绿空间规模特征,蓝绿空间分布特征的重要性较低。城区尺度下绿地分布特征是影响整体降温的关键因素,蓝绿关系的影响明显减弱。市域尺度和城区尺度的研究表明,蓝绿空间格局影响夏季降温存在明显的尺度效应,各城镇蓝绿空间指标的相关程度和贡献率水平均随研究尺度变化而不同。对于最高地表温度,市域尺度下水体的边缘复杂性、蓝绿空间规模和水绿的融合性影响更大,而在城区尺度下水体的聚集性、水面的大小发挥重要作用;对于平均冷岛强度,市域尺度下水绿融合性、水体边缘复杂度和蓝绿规模影响较大,而在城区尺度下绿地分布的紧密程

度、水绿规模发挥主导作用。

3.1 加强局部高温地区的水体格局优化

水体格局和蓝绿关系是降低局部高温的主导因素。市域尺度下应注重保持水体形状复杂度,恢复部分渠化水岸自然曲折的原始形态,延长水陆交错带的长度,推进局部高温地区的重点修复;此外,维持足量的蓝绿空间,加宽滨水绿地建设,均有利于缓解局部高温^[25-26]。城区尺度下,保证水体的完整性和足够的水面率,加强管理,防止建设活动对自然水面的侵占,对局部高温的缓解有重要意义^[27-28]。

3.2 提升蓝绿关系以缓解整体高温

蓝绿关系和绿地格局是整体降温的主导因素。在城市总体规划中,应加强控制滨水绿地的宽度和蓝绿总规模的底线,构建蓝绿耦合的生态格局,发挥蓝绿空间降温的协同作用,有利于城市整体降温。在城市具体形态设计中,聚集的、有一定规模的绿地对城市整体降温有较大贡献,因此城市建设中在控制绿地率的同时,还应保证较大面积的绿地空间,以发挥更大的降温效应^[25-26]。

3.2 尺度分级、目标分区的精细化管控

城镇蓝绿空间格局对夏季降温的影响存在明显的尺度效应,对降低整体地表温度和局部高温的差异较大,因此有必要以需求为导向,对热环境施行尺度分级、目标分区的细化精准管控。综合分析城镇各尺度下的热环境测度结果,结合最高温度和平均冷岛强度的关联分析,准确研判不同尺度各空间单元的突出问题,划定核心优化区、局部高温抑制区、整体温度调控区和低温舒适区等,针对各片区具体问题与控制优化。例如:市域尺度下,2、3、5等6个控规单元属于局部高温抑制区,应重点关注水体形状调整、蓝绿规模底线控制、滨水绿地建设和水体

分布情况;9、10、12等9个控规单元属于整体温度调控区,应着重滨水绿地建设、水体形状调整和蓝绿规模底线控制;而6、8、14、15这4个控规单元属于核心优化区,应全面考虑上述蓝绿空间格局指数的调控。城区尺度下,U7、U8、U15等11个组团单元市域局部高温抑制区,重点控制其水体分布、水体形状和蓝绿规模;U18、U19等5个组团单元属于整体温度调控区,注重提高绿地整体性和蓝绿空间总规模;而U3、U4等7个核心优化区单元应同时关注水体分布、水体形状、蓝绿规模和绿地聚集度等指数。

本研究引入增强回归树模型,量化各类指标的影响程度,在总量控制、布局优化和形状设计3个层面为城镇蓝绿格局优化提供多维度的指导,提高规划设计的可操作性。本研究也具有一定的局限性:第一,研究主要针对江南水网地区的实践需求展开循证,具有一定的典型性,研究过程中使用2021年8月26日10:30单一的卫星遥感数据进行验证,尚需针对不同地区开展更多的实证研究;第二,在降温效应的度量方面,研究重点关注局部高温的缓解和空间单元的整体降温,冷岛的扩散距离和梯度等空间性规律有待继续探索;第三,高温、高湿共同作用下,会使人的热感觉增强导致降低对高温的接受度,因此,蓝绿空间对风湿热的综合影响有待进一步探讨。

参考文献 References

- [1] YENNETI K, DING L, PRASAD D, et al. Urban overheating and cooling potential in Australia: an evidence-based review [J/OL]. *Climate*, 2020, 8 (11) : 126 [2022-10-27]. <https://doi.org/10.3390/cli8110126>.
- [2] 王敏,侯晓晖,汪洁琼.基于传统生态智慧的江南水网空间韧性机制及实践启示[J].*风景园林*,2018,25(6):52-57. WANG M, HOU X H, WANG J Q. Resilience mechanism and practical insights from water-related physical form in Jiangnan based on traditional ecological wisdom [J]. *Landscape architecture*, 2018, 25(6) : 52-57 (in Chinese with English abstract).
- [3] 宋爽,石梦溪,胡珊珊,等.东北地区中心城市城区蓝绿空间演化及驱动机制研究[J].*南京林业大学学报(自然科学版)*,2022,46(4):221-229. SONG S, SHI M X, HU S S, et al. Evolutions and driving mechanisms of urban blue-green spaces in northeast China: a case study with the urban central district of Harbin City [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (natural sciences edition)*, 2022, 46(4) : 221-229 (in Chinese with English abstract).
- [4] WONG N H, YU C. Study of green areas and urban heat island in a tropical city [J]. *Habitat international*, 2005, 29(3) : 547-558.
- [5] MOYER A N, HAWKINS T W. River effects on the heat island of a small urban area [J]. *Urban climate*, 2017, 21: 262-277.
- [6] 王云才.基于空间生态特性的景观图式语言研究方法与方法论[J].*风景园林*,2018,25(1):28-32. WANG Y C. The research method and methodology of pattern language based on ecological nature of landscape space [J]. *Landscape architecture*, 2018, 25(1) : 28-32 (in Chinese with English abstract).
- [7] 陈爱莲,孙然好,陈利顶.传统景观格局指数在城市热岛效应评价中的适用性[J].*应用生态学报*,2012,23(8):2077-2086. CHEN A L, SUN R H, CHEN L D. Applicability of traditional landscape metrics in evaluating urban heat island effect [J]. *Chinese journal of applied ecology*, 2012, 23(8) : 2077-2086 (in Chinese with English abstract).
- [8] 成雅田,吴昌广.基于局地气候优化的城市蓝绿空间规划途径研究进展[J].*应用生态学报*,2020,31(11):3935-3945. CHENG Y T, WU C G. Planning approach of urban blue-green space based on local climate optimization: a review [J]. *Chinese journal of applied ecology*, 2020, 31(11) : 3935-3945 (in Chinese with English abstract).
- [9] 李春林,刘森,胡远满,等.基于增强回归树和Logistic回归的城市扩展驱动力分析[J].*生态学报*,2014,34(3):727-737. LI C L, LIU M, HU Y M, et al. Driving forces analysis of urban expansion based on boosted regression trees and Logistic regression [J]. *Acta ecologica sinica*, 2014, 34(3) : 727-737 (in Chinese with English abstract).
- [10] 尹才,刘森,孙风云,等.基于增强回归树的流域非点源污染影响因子分析[J].*应用生态学报*,2016,27(3):911-919. YIN C, LIU M, SUN F Y, et al. Influencing factors of non-point source pollution of watershed based on boosted regression tree algorithm [J]. *Chinese journal of applied ecology*, 2016, 27(3) : 911-919 (in Chinese with English abstract).
- [11] 葛跃,王明新,孙向武,等.基于增强回归树的城市PM_{2.5}日均值变化分析:以常州为例[J].*环境科学*,2017,38(2):485-494. GE Y, WANG M X, SUN X W, et al. Variation analysis of daily PM_{2.5} concentrations based on boosted regression tree: a case study in Changzhou [J]. *Environmental science*, 2017, 38(2) : 485-494 (in Chinese with English abstract).
- [12] WANG Y C, SHENG S, XIAO H B. The cooling effect of hybrid land-use patterns and their marginal effects at the neighborhood scale [J/OL]. *Urban forestry & urban greening*, 2021, 59: 127015 [2022-10-27]. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127015>.
- [13] GUO G H, WU Z F, CHEN Y B. Complex mechanisms linking land surface temperature to greenspace spatial patterns: evidence from four southeastern Chinese cities [J]. *The science of the total environment*, 2019, 674: 77-87.
- [14] 谢启姣,段吕晗,汪正祥.夏季城市景观格局对热场空间分布的影响:以武汉为例[J].*长江流域资源与环境*,2018,27(8):

- 1735-1744. XIE Q J, DUAN L H, WANG Z X. Impact of urban landscape pattern on spatial distribution of thermal field in summer: a case study of Wuhan [J]. Resources and environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(8): 1735-1744 (in Chinese with English abstract).
- [15] 沈中健, 曾坚, 梁晨. 闽南三市绿地景观格局与地表温度的空间关系[J]. 生态学杂志, 2020, 39(4): 1309-1317. SHEN Z J, ZENG J, LIANG C. Spatial relationship of greenspace landscape pattern with land surface temperature in three cities of southern Fujian [J]. Chinese journal of ecology, 2020, 39(4): 1309-1317 (in Chinese with English abstract).
- [16] 余俞寒, 张文婷, 王加波, 等. 武汉城市群热岛效应对土地利用响应及其预测[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(12): 158-168. YU Y H, ZHANG W T, WANG J B, et al. Prediction of Wuhan urban agglomeration urban heat island and its response to land use [J]. Environmental science & technology, 2018, 41(12): 158-168 (in Chinese with English abstract).
- [17] 王敏, 朱雯. 蓝绿空间格局对城市降温的影响及其边际效应: 基于地表温度反演算法[C]// 成玉宁, 杨锐. 数字景观: 中国第五届数字景观国际论坛论文集. 南京: 东南大学出版社, 2021: 116-124. WANG M, ZHU W. The effect of blue-green space on urban cooling and its marginal effects: based on land surface temperature retrieval algorithms [C]// CHEN Y N, YANG R. Digital landscape: Proceedings of the 5th International Forum on Digital Landscape in China. Nanjing: Southeast University Press, 2021: 116-124 (in Chinese with English abstract).
- [18] 韩笑, 单峰, 贾茵, 等. 新时期城市园林绿化评价指标研究: 以徐州市为例[J]. 中国园林, 2021, 37(12): 20-25. HAN X, SHAN F, JIA Y, et al. Research on the evaluation index of urban landscaping in the new era: a case study of Xuzhou [J]. Chinese landscape architecture, 2021, 37(12): 20-25 (in Chinese with English abstract).
- [19] 殷若晨, 方家, 朱丹, 等. 城市公园降温效益的测度与气候适应性设计策略[J]. 中国园林, 2022, 38(6): 121-126. YIN R C, FANG J, ZHU D, et al. Measurement of cooling efficiency in urban parks and strategies for climate adaptation design [J]. Chinese landscape architecture, 2022, 38(6): 121-126 (in Chinese with English abstract).
- [20] 陈前虎, 寿建伟, 吴松杰, 等. 城市道路和绿地布局对雨水污染状况的影响: 以杭州城市中心区为例[J]. 浙江工业大学学报(社会科学版), 2015, 14(3): 254-260. CHEN Q H, SHOU J W, WU S J, et al. The impact of urban land-use spatial patterns on inland river water quality: a case study of Hangzhou city center [J]. Journal of Zhejiang University of Technology (social science edition), 2015, 14(3): 254-260 (in Chinese with English abstract).
- [21] KONG F H, YIN H W, 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.
- [22] 王敏, 朱雯. 城市绿地影响碳中和的途径与空间特征: 以上海市黄浦区为例[J]. 园林, 2021, 38(10): 11-18. WANG M, ZHU W. The impact of urban green space on carbon neutrality and spatial characteristics: a case study of Huangpu District in Shanghai [J]. Landscape architecture, 2021, 38(10): 11-18 (in Chinese with English abstract).
- [23] 侯宇初, 张冬有. 基于Landsat 8遥感影像的地表温度反演方法对比研究[J]. 中国农学通报, 2019, 35(10): 142-147. HOU Y C, ZHANG D Y. Comparison study on land surface temperature retrieval algorithms based on Landsat 8 remote sensing image [J]. Chinese agricultural science bulletin, 2019, 35(10): 142-147 (in Chinese with English abstract).
- [24] 赵芳, 欧阳勋志. 飞播马尾松林土壤有机碳空间分布及其影响因素[J]. 生态学报, 2016, 36(9): 2637-2645. ZHAO F, OUYANG X Z. Assessing relative contributions of various influencing factors to soil organic carbon in aerially-seeded *Pinus massoniana* plantations [J]. Acta ecologica sinica, 2016, 36(9): 2637-2645 (in Chinese with English abstract).
- [25] 杜红玉. 特大型城市“蓝绿空间”冷岛效应及其影响因素研究: 以上海市为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2018. DU H Y. The cool island effect of urban blue-green spaces and impact factors in mega city [D]. Shanghai: East China Normal University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [26] 匡纬, 李莎, 周慧荻. 城市公园绿地布局公平性精准化评价方法研究: 以北京市海淀区为例[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(1): 160-169. KUANG W, LI S, ZHOU H D. Method of accurately evaluating spatial equity of urban park green space: a case study of Haidian District, Beijing [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(1): 160-169 (in Chinese with English abstract).
- [27] 苏王新, 常青, 刘筱, 等. 城市蓝绿基础设施降温效应研究综述[J]. 生态学报, 2021, 41(7): 2902-2917. SU W X, CHANG Q, LIU X, et al. Cooling effect of urban green and blue infrastructure: a systematic review of empirical evidence [J]. Acta ecologica sinica, 2021, 41(7): 2902-2917 (in Chinese with English abstract).
- [28] 涂婧林, 侯东瑞, 陈弋冉, 等. 国土空间生态修复关键区域系统识别与修复: 以武汉市蔡甸区为例[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(3): 47-55. TU J L, HOU D R, CHEN Y R, et al. Systematic identification and restoration of key areas for ecological restoration of territorial space: a case study of Caidian District, Wuhan City [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(3): 47-55 (in Chinese with English abstract).

Impact and scale effect of urban blue-green spatial pattern on summer cooling in Jiangnan water network areas based on remote sensing retrieval

ZHU Wen^{1,2}, WANG Min^{1,3}

1. *Eco-Smart Lab Attached to Ministry of Education Key Laboratory of Ecology and Energy-Saving Study of High Density Habitat (Tongji University), Shanghai 200092, China;*

2. *Guangzhou Institute of Urban Planning & Design Survey (GZPI), Guangzhou 510030, China;*

3. *College of Architecture and Urban Planning (CAUP), Tongji University, Shanghai 200092, China*

Abstract Global climate change has led to a gradual intensification of heat island effects and a significant increase in events of extreme high temperature at summer in urbans. How to effectively improve the cooling effect of urban blue-green spaces is an important way to adapt to the climate change and build a living environment with high-quality. The Landsat-8 data and radiative transfer equation was used to retrieve land surface temperature in Kunshan City. The correlation analysis and boosted regression tree (BRT) model of the urban blue-green spatial pattern and the measurement index of summer cooling effect were established constructed at the scale of urban and block to identify the key factors and their importance ranking of urban blue-green spatial patterns that affect summer cooling effects in the Jiangnan water network area and to explore the differences in spatial scale of cooling effect with comparative study. Results showed that there were four indicators with a relative contribution rate of over 10% for the impact of the blue-green spatial pattern on the summer maximum surface temperature at the scale of urban. The decreasing order of impact degree was as follows: index of water body shape > proportion of blue-green space > width of waterfront green space > aggregation index of water body. There were three indicators with a relative contribution rate of over 10% for the impact of the blue-green spatial pattern on the average intensity of cold island at the scale of urban. The decreasing order of impact degree was as follows: width of waterfront green space > index of water body shape > proportion of blue-green space. At the scale of block, there were five indicators with a relative contribution rate of over 10% for the impact of the blue-green spatial pattern on the summer maximum surface temperature at the scale of urban. The decreasing order of impact degree was as follows: index of water aggregation > average patch index of water > ratio of green space > ratio of water surface > index of water body shape. There were two indicators with a relative contribution rate of over 10% for the impact of the blue-green spatial pattern on the average intensity of cold island at the scale of urban. The decreasing order of impact degree was as follows: aggregation index of green space > proportion of blue-green space. It is indicated that the spatial pattern characteristics of urban blue-green space have significant scale effects on the correlation degree and contribution level of summer cooling. The optimization strategies of planning and design were proposed. It will provide a practical reference for creating a comfortable urban living environment at different scales.

Keywords blue-green space; cooling effect; spatial pattern; land surface temperature retrieval; scale effect

(责任编辑:陆文昌)