

DOI: 10.5846/stxb202205251482

赵海月, 胡森, 朱建宁, 黄婷婷, 张颖, 李亚丽, 严梦竹. 高密度中心城区蓝绿空间冷岛效应及其影响因素——以北京五环路以内地区为例. 生态学报, 2023, 43(12): 4904-4919.

Zhao H Y, Hu M, Zhu J N, Huang T T, Zhang Y, Li Y L, Yan M Z. Blue-green space cooling effect and its influencing factors in metropolitan area: A case study on the area within the Fifth Ring Road in Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(12): 4904-4919.

高密度中心城区蓝绿空间冷岛效应及其影响因素 ——以北京五环路以内地区为例

赵海月, 胡森, 朱建宁*, 黄婷婷, 张颖, 李亚丽, 严梦竹

北京林业大学园林学院, 北京 100083

摘要: 蓝绿空间作为城市绿色基础设施的重要组成部分, 对促进城市热环境健康、改善局地微气候具有重要作用。利用 Landsat 8 遥感影像、土地利用等数据, 基于辐射传输方程算法、K 均值聚类算法、相关性分析等方法, 量化了典型的高密度中心城区——北京五环快速路以内地区的 1199 块 1hm² 以上的蓝绿空间冷岛效应的表征指标, 并分析与蓝绿空间规模、形状复杂度、景观组成、环境组成、植被覆盖等要素的相关关系, 还根据蓝绿空间的不同降温特性进行分类, 探讨每类蓝绿空间在缓解高密度中心城区热岛效应中的独特作用、优势与机制。结果表明: (1) 蓝绿空间的规模、形状复杂度、景观组成等景观要素与冷岛效应的关系显著, 如总面积、绿地面积和水面面积与降温幅度、降温范围、降温服务呈显著正相关, 与降温效率和降温速率呈显著负相关; 周长与降温范围、降温服务呈显著正相关, 与降温效率和速率呈显著负相关; 周长面积比与降温幅度和降温服务呈显著负相关, 与降温效率和蓝绿空间自身温度呈显著正相关, 而形状指数则与降温范围和降温服务呈显著正相关。(2) 蓝绿空间的环境要素与冷岛效应也存在相关关系。蓝绿空间之间会产生冷岛效应的协同与促进现象, 蓝绿空间降温范围内的其他蓝绿空间的总面积与该蓝绿空间的降温幅度、降温范围、降温服务和辐射距离呈显著正相关, 与蓝绿空间自身温度呈显著负相关。(3) 蓝绿空间的总面积、水面面积、周长与降温幅度之间, 周长面积比与降温效率之间存在阈值, 为节约土地资源、保证降温效果, 建议不应过多超过阈值。(4) 基于蓝绿空间在降温幅度、效率、辐射距离等方面的差异, 将蓝绿空间划分为 4 类。高密度中心城区蓝绿空间规划建设应充分评估区域降温需求, 了解蓝绿空间降温现状, 合理配置具有不同降温特性和优势的蓝绿空间, 在土地和资金有限的情况下, 充分发挥各类蓝绿空间的冷岛效应。本研究有助于政府和规划师摸清当前蓝绿空间冷岛效应的现状、问题和发展潜力, 对理论和实践具有一定参考意义。

关键词: 蓝绿空间; 冷岛效应; 城市热岛; 高密度中心城区; 绿地规划; 绿地布局

Blue-green space cooling effect and its influencing factors in metropolitan area: A case study on the area within the Fifth Ring Road in Beijing

ZHAO Haiyue, HU Miao, ZHU Jianning*, HUANG Tingting, ZHANG Ying, LI Yali, YAN Mengzhu

School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: The blue-green spaces, the essential component of green infrastructure, play an important role in promoting the health of urban thermal environment and creating a comfortable microclimate. The typical metropolitan area, the district within the Fifth Ring Expressway in Beijing, was selected as the study area. The basic materials in the study are the Landsat 8 remote sensing image, the land use data and building vector data. We utilized the radiative transfer equation algorithm, K-means clustering algorithm, correlation analysis and other methods to quantify the cooling effect indicators of 1199 blue-green spaces with an area of more than 1 hm². We analyzed the correlation between the landscape and environment metrics

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51908037); 城乡生态环境北京实验室, 北京市共建项目专项

收稿日期: 2022-05-25; **网络出版日期:** 2023-02-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bjzn0413@bjfu.edu.cn

of the blue-green spaces, such as scale, shape complexity, landscape components, environmental components and vegetation coverage, and their cooling effect indicators. Then the blue-green spaces were classified according to the diverse cooling performance. Finally, we discussed the cooling functions, advantages and mechanisms of each category of the blue-green spaces. The results show that: (1) the scale, shape complexity and landscape components of blue-green space have a significant correlation with cooling effect. For example, total area, green space area and water area have the significantly positive correlation with the cooling intensity, cooling area and cooling service and have a significantly negative correlation with the cooling efficiency and cooling gradient. Perimeter of blue-green space has a significantly positive correlation with cooling area and cooling service and have a significantly negative correlation with cooling efficiency and cooling gradient. The ratio of perimeter to area has a significantly negative correlation with the cooling intensity and cooling service and have a significantly positive correlation with the cooling efficiency and the land-surface temperature of the blue-green space. And the shape index has a significantly positive correlation with the cooling area and cooling service. (2) There is also a correlation between the environmental components of the blue-green spaces and their cooling effect. The synergy and promotion of cooling effect occurs between the blue-green spaces. The total area of other blue-green spaces in the cooling area is significantly positively correlated with the cooling intensity, cooling area, cooling service and cooling distance of the blue-green space and is significantly negatively correlated with the land-surface temperature of itself. (3) There are thresholds among the total area, water area, perimeter of blue-green space and its cooling intensity and among the ratio of perimeter to area and cooling efficiency. In order to save the land resources, it is recommended that the indicators above don't exceed the thresholds. (4) Based on the performance of cooling intensity, cooling efficiency, cooling distance and so on, the blue-green spaces are divided into 4 categories. We believe that before the blue-green space planning and construction in metropolitan areas, the government should evaluate cooling demand, understand the cooling conditions of blue-green spaces and reasonably allocate them with suitable cooling functions and advantages. Only in this way can all categories of blue-green spaces exerts the enough cooling effect with the limited land and funds. This study will help the government and planners to understand the current situation, find the problems and development potential of blue-green spaces cooling effect. And it also has some references for the relevant theories and practices.

Key Words: blue-green space; cooling effect; urban heat island; metropolitan area; green space planning; green space layout

随着气候变化和城市化进程不断加深,过去大都市的快速“增量扩张”导致城市下垫面及景观格局发生演化^[1],改变了城市地表的热力性质和近地表的大气层结构,从而打破地气界面的能量交换平衡,城市出现了热岛效应^[2-4]。而近些年来,以“精明增长”为特点的“存量挖掘”,出现了越来越多的密集化与集约化的高密度中心城区,热岛导致的城市问题愈加凸显^[5]。研究证实,高温导致的居民健康风险、病死事件和经济支出攀升^[1,6-7];同时,也带来了“高温-能源消耗-‘温室效应’-高温”的恶性循环^[8],致使建成人居环境健康和生态健康进一步恶化,面临严重挑战^[9]。城市蓝绿空间是由城市中各类水域、湿地、绿地等开敞空间所构成的空间系统^[10],既包含农业空间和生态空间中的农田、山体、森林、草地等,城镇空间中的公园、防护绿带、公共开放空间等,也包含由河流、湖泊、水库、池塘、滩地、沼泽等不同形态水体构成的复合水体空间^[11]。蓝绿空间作为绿色基础设施的重要组成部分,具有诸多生态系统服务,对缓解高密度城区热岛问题、改善城市热环境和促进生态环境健康的作用显著^[12-13]。因此,如何利用蓝绿空间缓解城市热岛问题成为了研究热点。

目前,国内外的学者就蓝绿空间的冷岛效应进行了大量的研究。从宏观角度进行的研究主要包括:市域范围的城市冷-热岛的空间分布^[14-15]、时空演变规律及影响因素^[16-17],蓝绿空间的景观格局对冷岛效应的影响^[18-20],城市森林^[21-22]、水体湖泊^[23-24]、湿地^[25-27]等单一土地覆被类型的冷岛效应特征及评估等。也有一部分研究从微观角度出发,包括:单个绿地冷岛效应的实测评价与模拟^[28-29],多个公园组成的蓝绿空间群的

冷岛效应影响因素研究^[30-32]等。随着研究的深入,过去关注较少的蓝绿空间类型(如街头绿地^[33-34]、街道植被^[35]等)、表征冷岛效应的新指标(如降温效率^[36-37]、降温效率阈值^[38]、降温贡献度^[39]等)得到了重视,扩充了研究的深度和广度。

整体而言,相关研究还存在一定不足。由于城市核心区、边缘区、郊区之间的地形地貌、下垫面、土地覆被等景观和空间的结构不同,蓝绿空间冷岛效应也存在着区域差异^[13,40-41]。目前宏观和微观尺度的研究缺少了过渡,很少有对城市某一特定地理区域的冷岛效应进行专门研究。此外,某些微观尺度的冷岛效应影响因素的研究,以权属(如公园)为依据^[42],研究样本数量较少,一定程度上影响了分析结果的准确性。

因此,本文选取典型的高密度中心城区——北京五环快速路以内地区为研究区域,该区域是北京市土地利用、城市功能、空间活力最为复合和多样化的地区^[39]。同时,2000至2019年间,由于北京城市化不断推进、人口集聚,风险较高的热岛区域增加20%,普通热岛地区增加近30%^[43],更形成了由占比79.85%的主热岛(五环以内地区为主)和诸多小热岛组成的城市热岛群,并且这些热岛之间连通性逐年增加,空间分布更加紧密^[44],研究区域的热环境问题愈加突出^[8]。可见,针对这一特定区域蓝绿空间的冷岛效应研究具有较大的科学价值和现实意义。本研究将探索高密度地区蓝绿空间冷岛效应的关键影响因子,并基于冷岛效应表现特征对蓝绿空间分类,探讨各类蓝绿空间在缓解高密度城区热岛中的作用和优势,以期为城市管理者 and 规划师提供一定经验和参考。

1 研究区域概况

北京是我国首都,毗邻河北省和天津市,面积16410km²,地势西北高、东南低,为暖温带半湿润半干旱季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。研究区域为北京市五环绕城高速公路以内地区,涉及东城、西城、海淀、朝阳、石景山和丰台6个行政区(图1),承担城市总体规划定位的政治、文化、国际交往和科技创新4大中心功能^[45]。区域内人口密集,截至2015年,五环以内常住人口占全市的48.9%,常住外来人口占48.4%,而面积仅占市域的4.1%(66655hm²),是北京市的高密度中心城区。

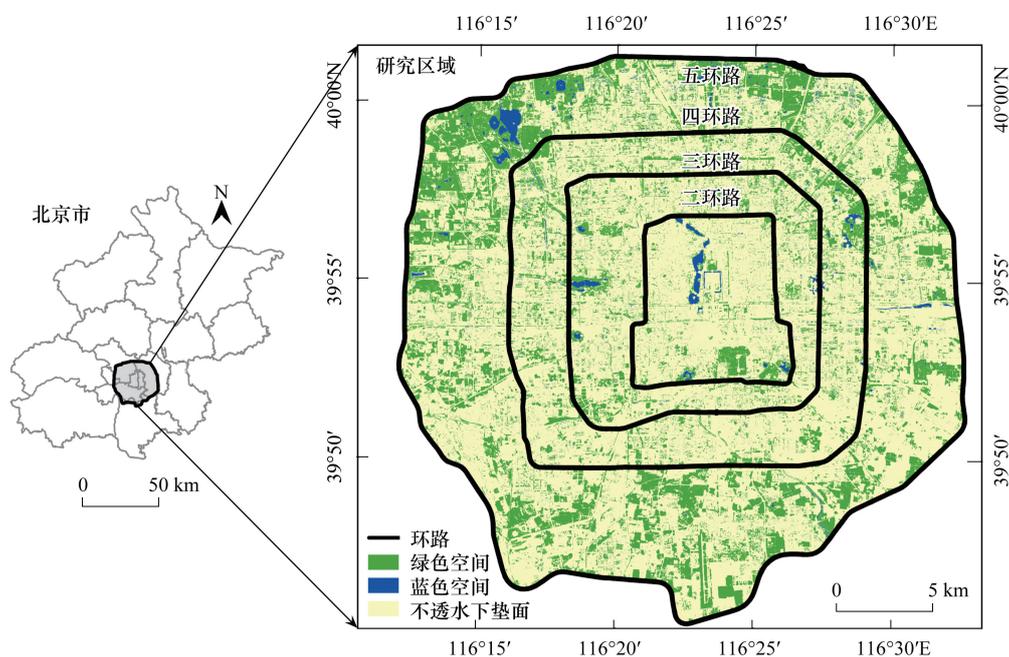


图1 研究区域的区位及其土地利用

Fig.1 Location and landuse of the study area

2 研究方法

2.1 数据来源与预处理

本研究的基础数据包含遥感影像、土地利用、建筑矢量数据。遥感影像来源于 Landsat8 TIR 库,精度为 30m,时间为格林尼治时间 2017 年 9 月 12 日,行列号 123/32,无云,大气状况良好,满足地表温度反演的质量要求。遥感影像的预处理在 ENVI5.3 平台对热红外数据和多光谱数据进行了辐射定标和大气校正,以消除传感器、大气等因素的影响。

土地利用数据的时间为 2017 年,精度 10m,数据整体质量良好,包含 10 个土地利用类型^[46],研究区域包含其中的 8 类。根据分类基础,在 Arcgis10.2 平台将农田、森林、灌木、草地合并为绿色空间,将湿地、水体合并为蓝色空间。由于裸地和某些不透水下垫面(如水泥)在夏半年日最高地表温度差异不显著^[47-48],故将不透水表面和裸地合并为不透水下垫面空间(图 1)。随后,合并在空间上相连接或距离 30m 范围内的绿色空间和蓝色空间。研究表明,面积过小的蓝绿空间大多不具备冷岛效应或作用微弱,为减少计算量和排除干扰,借鉴相关研究^[5,42],删去 1hm²以下的蓝绿空间。另外,研究区域西北部的颐和园、海淀公园等与周边大量果园相连成片,形成大于 1900hm²的巨型斑块,与其他蓝绿空间在规模上差异极大,同时也不具备高密度中心城区蓝绿空间的典型性和普遍性的规模特征,故删去该斑块。最终获得研究范围内规模 1.03—465.48hm²的 1243 块蓝绿空间。

建筑矢量数据来源为 BIGEMAP 平台,该数据质量良好,包括建筑轮廓、空间位置以及建筑层数等信息。随后,在 Arcgis 中计算每幢建筑的占地面积,以 3m 作为建筑平均层高计算建筑总高度。

2.2 辐射传输方程模型算法反演地表温度

本研究采用在反演地表温度中应用较广,准确度较高^[49-50]的辐射传输方程模型算法,该方法的具体操作包括:在 Envi5.3 平台,将修正后的遥感影像经混合像元分解法计算植被覆盖度,随后计算地表比覆盖率并利用辐射传输方程模型计算黑体辐射亮度值,最后通过 Planck 公式计算获得研究区域的地表温度。

2.3 蓝绿空间的景观指标及冷岛效应表征指标的定义与选取

本研究以缓冲区法定义蓝绿空间冷岛效应的表征指标。首先,给蓝绿空间设置间距 30m、总长 600m 的多级缓冲区,并计算相邻缓冲区不透水下垫面的平均地表温度差 Δt 。如果蓝绿空间在 n 米范围内具有冷岛效应,其 Δt_n 应大于 0,且 Δt_n 的变化率小于 0 ($\Delta t_n - \Delta t_{n-1} < 0$)。直至不符合上述规律的转折点出现,将转折点至蓝绿空间边界的距离定义为蓝绿空间冷岛效应的最远辐射距离 (L_{Max}),将最远辐射距离的缓冲区内不透水下垫面的平均温度 ($T_{L_{\text{Max}}}$) 与蓝绿空间平均温度 (T_{BG}) 的差值,定义为蓝绿空间的冷岛效应强度 (BGCI),经计算共有 1199 块蓝绿空间具有冷岛效应(图 2)。研究还计算了冷岛效应覆盖面积 (BGCA)、冷岛效应速率 (BGCG)、冷岛效应效率 (BGCE)、冷岛效应服务 (BGCS)(表 1)。

本研究还选取了蓝绿空间的景观指标及其环境指标。景观指标包括总面积 (BGA)、周长 (C_{BG})、周长面积比 (R_{CA})、形状指数 (BGSi)、绿地面积 (GA)、水体面积 (WA)、水体占比 (WP)、归一化植被指数 (NDVI_{BG})。

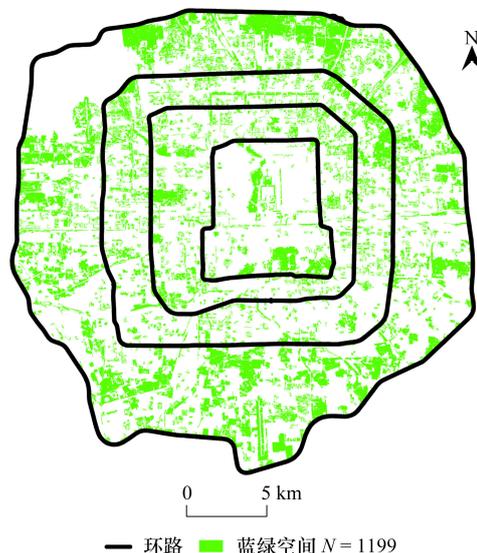


图 2 研究区域内具有冷岛效应的蓝绿空间分布

Fig.2 Spatial distribution of blue-green spaces with cooling effect in the study area

环境指标是蓝绿空间的冷岛效应覆盖范围内的景观指标,包括冷岛覆盖范围内的归一化植被指数($NDVI_{BCCA}$)、覆盖范围内的蓝绿空间总面积(BGA_{BCCA})及占比(BGP_{BCCA})、建筑面积占比(BAP_{BCCA})、建筑平均高度(H_B)等。研究对上述指标进行正态分布检验,呈现正态分布的指标(R_{CA} 、 $NDVI_{BG}$ 、 $NDVI_{BCCA}$ 、 BGP_{BCCA} 、 BAP_{BCCA})进行 Pearson 相关性分析,呈现非正态分布的指标(BGA 、 C_{BC} 、 $BGSI$ 、 GA 、 WA 、 WP 、 BGA_{BCCA} 、 H_B),则进行 Spearman 相关性分析。

表 1 部分蓝绿空间的景观指标及其冷岛效应表征指标的定义、含义及计算公式

Table 1 The definitions, meanings and equations of some landscape and cooling indicators of blue-green spaces

指标 Indicators	定义 Definition	含义 Meaning	公式 Equation
冷岛效应辐射距离 Cooling distance	蓝绿空间边界至第一个温度转折点的缓冲区边界的距离	最远降温距离	—
冷岛效应强度 Cooling intensity	辐射距离缓冲区内不透水下垫面的平均地表温度(T_{LMax})与蓝绿空间的平均地表温度(T_{BG})的差值	降温幅度	$BGCI = T_{LMax} - T_{BG}$
冷岛效应覆盖面积 Cooling area	蓝绿空间边界至最远辐射距离之间的缓冲区面积	降温覆盖范围	—
冷岛效应速率 Cooling gradient	蓝绿空间冷岛效应降温幅度与辐射距离(L_{Max})的比值	单位距离的降温幅度	$BGCG = \frac{BGCI}{L_{Max}}$
冷岛效应效率 Cooling efficiency	蓝绿空间冷岛效应覆盖面积与蓝绿空间面积(BGA)的比值	单位面积蓝绿空间产生冷岛效应的面积	$BGCE = \frac{BGCA}{BGA}$
冷岛效应服务 Cooling service	蓝绿空间产生冷岛效应的面积与降温幅度的乘积	冷岛效应范围内的总降温幅度	$BGCS = BGCA \times BGCI$
蓝绿空间平均地表温度 Average land-surface temperature of blue-green space	蓝绿空间内部的地表平均温度	—	—
周长面积比 Ratio of perimeter and area	蓝绿空间周长(C_{BC})与其面积的比值	单位面积的周长	$R_{CA} = \frac{C_{BC}}{BGA} \times 100\%$
形状指数 Shape index	蓝绿空间周长与相同面积且形状为圆形的蓝绿空间周长的比值	蓝绿空间的形状复杂度	$BGSI = \frac{C_{BC}}{2 \times \sqrt{\pi \times BGA}}$

T_{LMax} :缓冲区内不透水下垫面的平均地表温度/°C; T_{BG} :蓝绿空间平均地表温度/°C; $BGCI$:冷岛效应强度/°C; L_{Max} :冷岛效应辐射距离/m; $BGCG$:冷岛效应速率/(°C/m); BGA :蓝绿空间面积/hm²; $BGCE$:冷岛效应效率; $BGCA$:冷岛效应覆盖面积/hm²; $BGCS$:冷岛效应服务/°C; C_{BC} :蓝绿空间周长/m; R_{CA} :周长面积比/m⁻¹; $BGSI$:形状指数

2.4 基于冷岛效应特征的蓝绿空间分类及识别

冷岛效应的 7 个指标表征蓝绿空间所产生降温作用的不同特征,本文使用 K 均值聚类的方法,识别出具有不同降温特征的蓝绿空间集合。研究先对 7 个指标进行归一化,以保证后续计算的准确性。其次,通过 Elbow 法确定 K 值。Elbow 法在保证结果准确性的基础上,能够更快、更便捷地处理数量不大且结构简单的数据^[51]。经计算,当 K 值为“4”的时候,簇内误差方差(SSE)最小,由此确定“4”为合适的 K 值,操作在 Python 2.7 平台进行。最后,经聚类分析,迭代 30 次后,将 1199 块蓝绿空间分为 4 类。

3 结果与分析

3.1 蓝绿空间冷岛效应的影响因素

将上述选取的 13 个蓝绿空间景观指标及环境指标分为 5 组,分别探讨规模、形状复杂度、景观组成、环境组成、植被覆盖等要素对蓝绿空间冷岛效应的影响,结果见表 2。

表 2 蓝绿空间冷岛效应与景观特征的相关性

Table 2 Correlation between cooling effect and landscape metrics of blue-green space

要素 Elements	指标 Indicators	蓝绿空间平均 地表温度 Average land-surface temperature (T_{BC})	冷岛效应 强度 Cooling intensity (BGCI)	冷岛效应 覆盖面积 Cooling area (BGCA)	冷岛效应 服务 Cooling service (BGCS)	冷岛效应 效率 Cooling efficiency (BGCE)	冷岛效应 速率 Cooling gradient (BGCG)	冷岛效应 辐射距离 Cooling distance (L_{Max})
规模 Scale	总面积(BGA)	-0.410 **	0.496 **	0.837 **	0.750 **	-0.732 **	-0.545 **	0.150 **
	周长(C_{BC})	-0.320 **	0.361 **	0.840 **	0.680 **	-0.595 **	-0.406 **	0.095 **
形状复杂度 Shape complexity	周长面积比(R_{CA})	0.408 **	-0.535 **	-0.353 **	-0.410 **	0.520 **	0.196 **	-0.177 **
	形状指数(BGSI)	-0.158 **	0.144 **	0.689 **	0.482 **	-0.347 **	-0.180 **	0.009
景观组成 Landscape components	绿地面积(GA)	-0.393 **	0.482 **	0.827 **	0.737 **	-0.734 **	-0.535 **	0.137 **
	水体面积(WA)	-0.528 **	0.528 **	0.749 **	0.732 **	-0.704 **	-0.586 **	0.206 **
	水体占比(WP)	-0.255 **	0.271 **	0.152	0.208 *	-0.190 *	-0.271 **	0.093
环境组成 Environmental components	辐射范围的蓝绿空间面积 (BGA_{BGCA})	-0.447 **	0.564 **	0.839 **	0.792 **	-0.203 **	-0.345 **	0.575 **
	辐射范围的蓝绿空间面积 占比(BGP_{BGCA})	-0.282 **	0.194 **	0.111 **	0.119 **	0.069 *	-0.108 **	0.329 **
	辐射范围的建筑占地面 积占比(BAP_{BGCA})	0.282 **	-0.194 **	-0.111 **	-0.119 **	-0.069 *	0.108 **	-0.329 **
	辐射范围的建筑平均高 度(H_B)	-0.285 **	-0.063 *	0.021	-0.017	0.060 *	0.043	-0.028
植被覆盖 Vegetation coverage	蓝绿空间的 NDVI ($NDVI_{BC}$)	-0.174 **	0.360 **	0.231 **	0.279 **	-0.395 **	-0.157 **	0.097 **
	辐射范围的 NDVI ($NDVI_{BGCA}$)	-0.131 **	0.099 **	0.139 **	0.133 **	-0.193 **	-0.068 *	0.042

** 和 * 分别代表在 0.01 和 0.05 水平上具有显著性; GA :绿地面积 Green space area; WA :水体面积 Water area; WP :水体占比 Water proportion; BGA_{BGCA} :辐射范围的蓝绿空间面积 Area of blue-green spaces in cooling range; BGP_{BGCA} :辐射范围的蓝绿空间面积占比 Area proportion of blue-green spaces in cooling range; BAP_{BGCA} :辐射范围的建筑占地面面积占比 Area proportion of buildings in cooling range; H_B :辐射范围的建筑平均高度 Average height of buildings in cooling range; NDVI:归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index; $NDVI_{BC}$:蓝绿空间的归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index of blue-green space; $NDVI_{BGCA}$:辐射范围的归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index of cooling range

3.1.1 蓝绿空间的规模要素对其冷岛效应的影响

蓝绿空间的总面积(BGA)与冷岛效应指标的相关性分析结果显示: BGA 与 $BGCI$ 、 $BGCA$ 和 $BGCS$ 呈显著正相关关系,与 T_{BC} 、 $BGCG$ 和 $BGCE$ 呈显著负相关关系。表明随着 BGA 的增加,蓝绿空间的降温幅度、降温范围(图 3)和降温服务呈现增加趋势,蓝绿空间自身温度、降温效率和速率不断下降。拟合模型显示: $BGCI$ 和 BGA 与 T_{BC} 之间呈对数关系(图 3),随着 BGA 的增大, $BGCI$ 和 T_{BC} 的变化率逐渐减小,拟合模型解释率分别为 29.7% 和 20.7%。模型还显示: $BGCI$ 、 T_{BC} 与 BGA 之间存在一个阈值,超过该值后, BGA 继续增大, $BGCI$ 和 T_{BC} 的变化趋势将不再显著,该值可能在 40—50 hm^2 范围内。

蓝绿空间周长(C_{BC})与 $BGCA$ 、 $BGCS$ 呈显著正相关关系,与 $BGCG$ 和 $BGCE$ 呈显著负相关关系。表明蓝绿空间的 C_{BC} 越大,其冷岛效应的影响范围和降温服务也越大(图 3),蓝绿空间的降温能力显著提升,而降温效率和速率有所降低。进一步拟合模型发现, $BGCE$ 与 C_{BC} 呈幂函数关系(图 3),模型解释率 40.6%,二者也存在一个阈值, C_{BC} 超过 5000m 后继续增加,降温效率就很低了。

上述结果表明,蓝绿空间同时具备高降温效率、速率与高降温能力存在矛盾性。尤其对于土地资源奇缺的高密度中心城区,需权衡蓝绿空间建设规模、降温能力和降温效率之间的关系,要根据降温需求,合理确定规模,建议面积不超过 50 hm^2 ,周长不超过 5000m,以提高土地利用效率,实现低成本投入和较高的热环境舒适度回报。

3.1.2 蓝绿空间的形状复杂度要素对其冷岛效应的影响

蓝绿空间的周长面积比(R_{CA})与冷岛效应指标的相关性结果表明: R_{CA} 与 $BGCI$ 、 $BGCS$ 呈显著负相关关系,

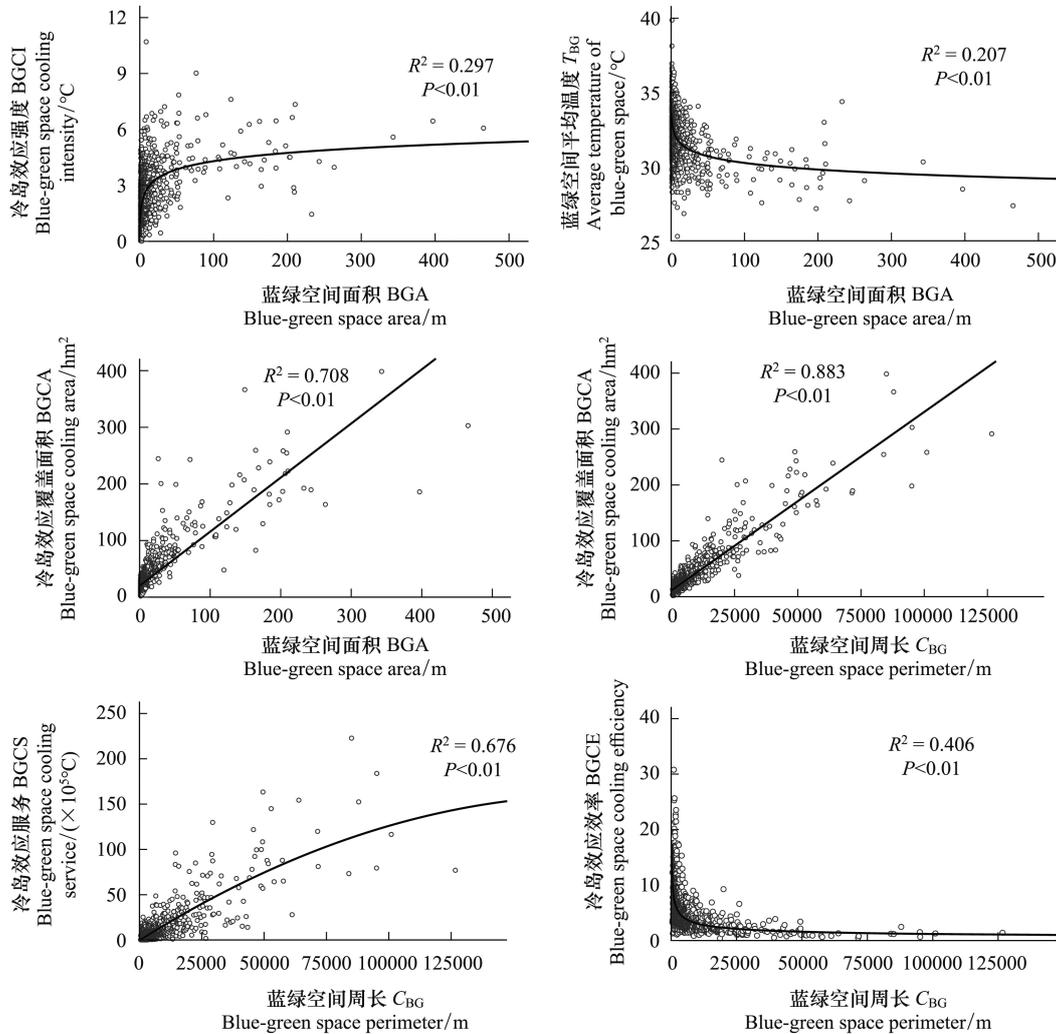


图 3 规模要素与蓝绿空间冷岛效应指标的关系

Fig.3 Relationship between scale elements and cooling effect indicators

与 T_{BG} 和 BGCE 呈显著正相关关系,也就是 R_{CA} 越小,蓝绿空间的形态越规则,其降温幅度和降温服务就越大,蓝绿空间的内部温度和降温效率越低(图 4)。经拟合, R_{CA} 与 BGCI 呈三次幂函数关系,模型解释率 33.4%,当 R_{CA} 大于 16 时,蓝绿空间的降温幅度小于 1°C ,大于 18 时,降温幅度消失,而 R_{CA} 在 5 以下时,蓝绿空间才具有较好的降温幅度(图 4)。而蓝绿空间的形状指数(BGSI)仅与 BGCA、BGCS 具有显著正相关关系,BGSI 越大,蓝绿空间的边界复杂程度越高,其冷岛效应的覆盖范围就越大(图 4,解释率 52.7%),产生的降温服务也越高(图 4,解释率 27.4%)。由此可见,形状复杂度越小,蓝绿空间的降温幅度越大,而降温的范围却越小。因此,在蓝绿空间规划时,应充分评估所在地区的降温幅度和范围的需要,通过冷岛的供需匹配,合理确定蓝绿空间的形状复杂度。

3.1.3 蓝绿空间的景观组成要素对其冷岛效应的影响

蓝绿空间的绿地面积(GA)与 BGCI、BGCA 和 BGCS 呈显著正相关关系,与 BGCG 和 BGCE 呈显著负相关关系。说明 GA 的增加,使蓝绿空间的降温强度、降温范围和降温服务有所提升,但降温效率和速率有所下降。

水体面积(WA)方面,由于 1199 块蓝绿空间中 WA 占总面积高于 1% 的不足 1/3,考虑到数据含有过多杂质,会影响结果的准确性。故选取 WA 占总面积 5% 以上的 140 个蓝绿空间进行 WA 和水体占比(WP)的相关

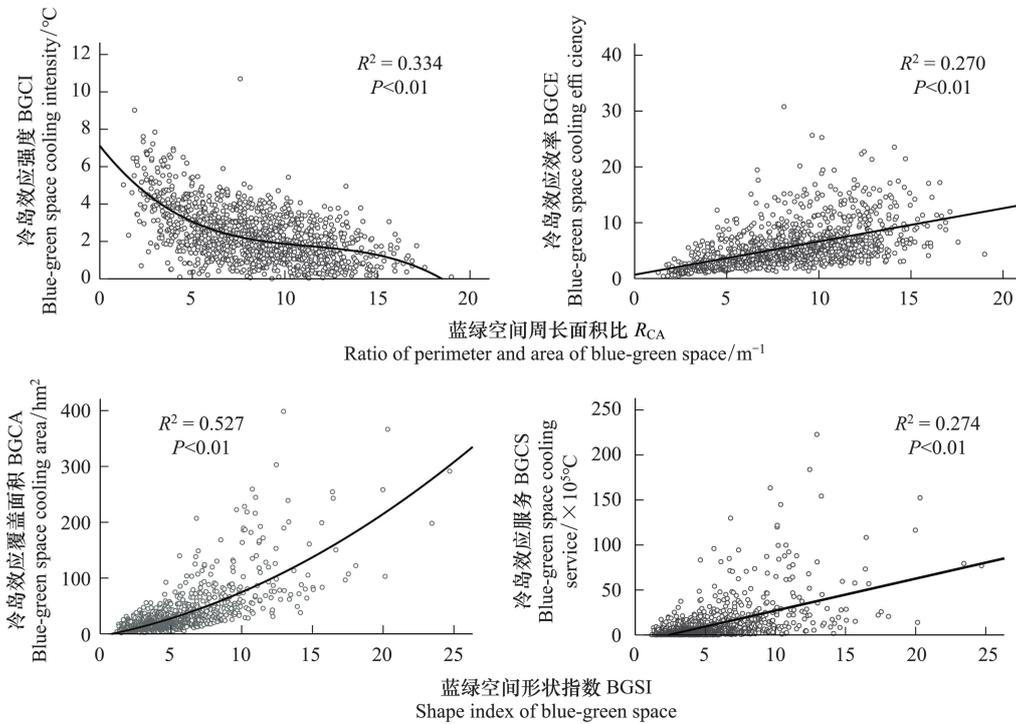


图 4 形状复杂度要素与蓝绿空间冷岛效应指标的关系

Fig.4 Relationship between elements of shape complexity and cooling effect indicators

性分析。结果发现:WA 对 BGCI、BGCA、BGCS 具有显著正相关关系,对 T_{BC} 、BGCE、BGCG 具有显著的负相关关系。表明随着 WA 的增加,蓝绿空间降温幅度、范围和服务均有所增加,但降温效率、速率、自身温度有所下降。经拟合,WA 也存在与 BGCI(图 5,解释率 69.9%)、 T_{BC} (图 5,解释率 32.5%)的阈值,阈值范围在 7—10hm²。超过阈值,蓝绿空间降温幅度和内部平均温度的变化不再明显。此外,拟合模型(图 5,解释率分别为 42.5%和 28.8%)显示 WA 占总面积高于 5%的蓝绿空间相比低于 5%的蓝绿空间能以更小的总面积获得更高的降温幅度,例如 WA 占比高于 5%的蓝绿空间降低 4℃需总面积达到 18.35hm²,而 WA 占低于 5%的蓝绿空间则需 75.45hm²,说明相同规模下的蓝绿混合空间比单一绿色空间具有更好的降温效果。

水体占比(WP)与任何冷岛效应指标均无显著相关关系($\rho < 0.4$),与 BGCI、 T_{BC} 、BGCG 的相关紧密程度一般($P < 0.01, 0.2 < \rho < 0.4$),与 BGCE($P < 0.05, \rho < 0.2$)和 BGCS($P < 0.05, 0.2 < \rho < 0.4$)的相关和紧密程度很弱,与 BGCA 和 L_{Max} 不具有任何相关关系($P > 0.05$)。表明 WP 的大小与蓝绿空间内部温度及其降温幅度、服务、效率、速率有关,但关系并不紧密,与辐射距离和冷岛效应覆盖范围无关系。

3.1.4 蓝绿空间冷岛效应辐射范围内的环境组成要素对其冷岛效应的影响

选取蓝绿空间冷岛效应辐射范围内的蓝绿空间总面积(BGA_{BGCA})及其占比(BGP_{BGCA})、建筑平均高度(H_B)、建筑占地面积的占比(BAP_{BGCA})作为环境组成要素的指标。

缓冲区内的蓝绿空间面积(BGA_{BGCA})对 BGCI、BGCA、BGCS、 L_{Max} 、 T_{BC} 具有显著相关关系;蓝绿空间面积占比(BGP_{BGCA})与 L_{Max} 、 T_{BC} 相关紧密程度一般($P < 0.01, 0.2 < \rho < 0.4$),与 BGCI、BGCA、BGCS、BGCG、BGCE 有较弱的相关性($P < 0.05, \rho < 0.2$)。结果表明,随着 BGA_{BGCA} 的增加,蓝绿空间的降温幅度、范围、服务、辐射距离呈显著增加趋势,蓝绿空间内部平均地表温度、降温效率和速率有所降低,但幅度并不明显。而 BGP_{BGCA} 的增加也对提升蓝绿空间的降温能力和效率、降低蓝绿空间内部温度具有一定的作用。综上,在蓝绿空间辐射覆盖的范围内增加蓝绿空间面积和占比,可能会使蓝绿空间之间产生冷岛效应的协同,有助于增强蓝绿空间的降温能力和降低蓝绿空间本身的地表温度。因此,对于某些高降温需求的地区,在大型蓝绿空间(如综合性

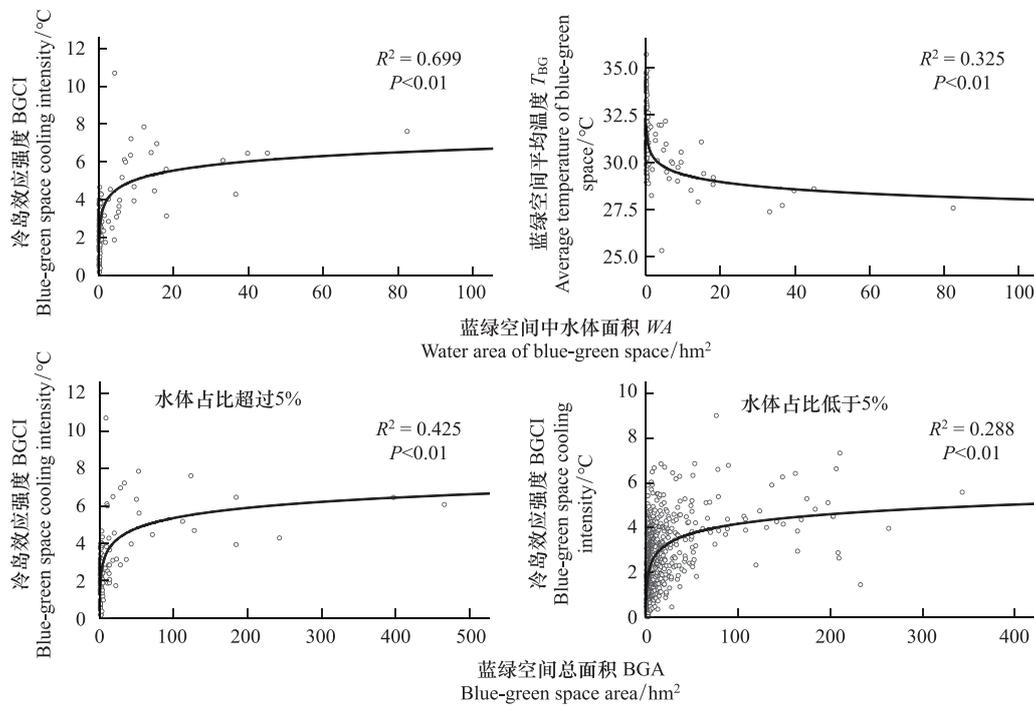


图5 景观组成要素与蓝绿空间冷岛效应指标的关系

Fig.5 Relationship between landscape components and cooling effect indicators

公园)降温覆盖范围内搭配一定面积和比例的小型蓝绿空间(如小型社区绿地、附属绿地等),通过其降温协同作用可以共同产生较为舒适的微气候。

缓冲区内的建筑占地面积的比例(BAP_{BGCA})与冷岛效应指标均具有相关性,与 L_{Max} 具有一般程度的负相关关系,与 T_{BG} 具有一般程度的正相关关系($P < 0.01, 0.2 < \rho < 0.4$),与BGCG具有较弱的正相关关系,与BGCI、BGCA、BGCS、BGCE具有较弱的负相关关系($P < 0.05, \rho < 0.2$)。表明BAP的增加,可能会在一定程度上减弱蓝绿空间的冷岛效应,降低其辐射距离、降温幅度、范围、服务、效率,也会提高蓝绿空间本身的温度。原因可能是建筑作为不透水下垫面,比热容低,吸热快,同时夏天能源使用量大,使建筑及其周边温度较高,与蓝绿空间产生较大的温差,进而促进了二者之间的能量交换,使得蓝绿空间本身温度升高,降低了其冷岛效应^[52-53]。

缓冲区内的建筑平均高度(H_B)仅与BGCI、BGCE和 T_{BG} 具有相关性,且密切程度不强,与其他冷岛指标无相关关系。其中,分别与BGCI和BGCE有较弱的负相关和正相关关系($P < 0.05, \rho < 0.2$),与 T_{BG} 为一般程度的负相关关系($P < 0.01, 0.2 < \rho < 0.4$)。表明提高 H_B 会在一定程度上降低蓝绿空间的冷岛效应,减弱其降温幅度并提高其本身的温度,但这个影响并不显著。

3.1.5 植被覆盖要素对蓝绿空间冷岛效应的影响

选取蓝绿空间的NDVI($NDVI_{BG}$)和蓝绿空间辐射范围内的NDVI平均值($NDVI_{BGCA}$)作为植被覆盖要素的指标。结果显示: $NDVI_{BG}$ 与冷岛指标均具有相关性($P < 0.01$),与BGCI、BGCA、BGCS有一般程度的正相关关系($0.2 < \rho < 0.4$),与BGCE有一般程度的负相关关系($0.2 < \rho < 0.4$),与BGCG、 L_{Max} 和 T_{BG} 有较弱的相关关系($\rho < 0.2$)。表明蓝绿空间的 $NDVI_{BG}$ 越大,地表植被覆盖越高,其降温幅度、范围、服务越好,但降温效率越小,而降温速率、辐射距离和蓝绿空间内部温度受其影响不大。

$NDVI_{BGCA}$ 与 L_{Max} 无相关关系($P > 0.05$),与其他冷岛指标的相关关系都很弱($P < 0.01, \rho < 0.2$)。其与BGCI、BGCA、BGCS为正相关,与BGCG($P < 0.05$)、 T_{BG} 和BGCE为负相关。说明提高蓝绿空间缓冲区内的植被覆盖对蓝绿空间的冷岛效应的提升具有小范围的促进作用,也再次证明了蓝绿空间之间可能存在降温协同作用。

3.2 基于冷岛效应特征的蓝绿空间分类与识别

经聚类分析,统计了4类蓝绿空间冷岛效应7大指标的平均值(表3),根据表3所反映的4类蓝绿空间冷岛效应在降温幅度、影响距离、效率等方面的突出表现特征,将其划分为高降温能力、低降温效率型,高降温效率、远辐射距离型,低降温能力、高降温速率型和降温能力、降温效率均衡型蓝绿空间(图6)。4类蓝绿空间归一化的冷岛效应7大特征指标以雷达图形式显示(图7),其归一化景观特征以柱状图显示(图8)。

表3 4类蓝绿空间的冷岛效应表征指标平均值
Table 3 Average values of cooling effect indicators of 4 clusters blue-green spaces

蓝绿空间类型 Types of blue-green spaces	蓝绿空间数量 Quantity of blue-green space	平均地表温度 Average land-surface temperature (T_{BG})	冷岛效应强度 Cooling intensity (BGCI)	冷岛效应覆盖面积 Cooling area (BGCA)	冷岛效应服务 Cooling service (BGCS)	冷岛效应效率 Cooling efficiency (BGCE)	冷岛效应速率 Cooling gradient (BGCG)	冷岛辐射距离 Cooling distance (L_{Max})
高降温能力、低降温效率型 High cooling capacity and low cooling efficiency	66	29.87	5.23	156.29	770.00	1.99	29.67	143.18
高降温效率、远辐射距离型 High cooling efficiency and long cooling distance	246	32.47	2.81	27.68	81.51	11.02	60.39	152.93
低降温能力、高降温速率型 Low cooling capacity and high cooling gradient	504	33.29	1.21	16.57	22.26	4.94	98.37	78.27
降温能力、降温效率均衡型 Balanced cooling capacity and cooling efficiency	383	31.01	3.10	36.93	117.70	3.78	39.61	110.91

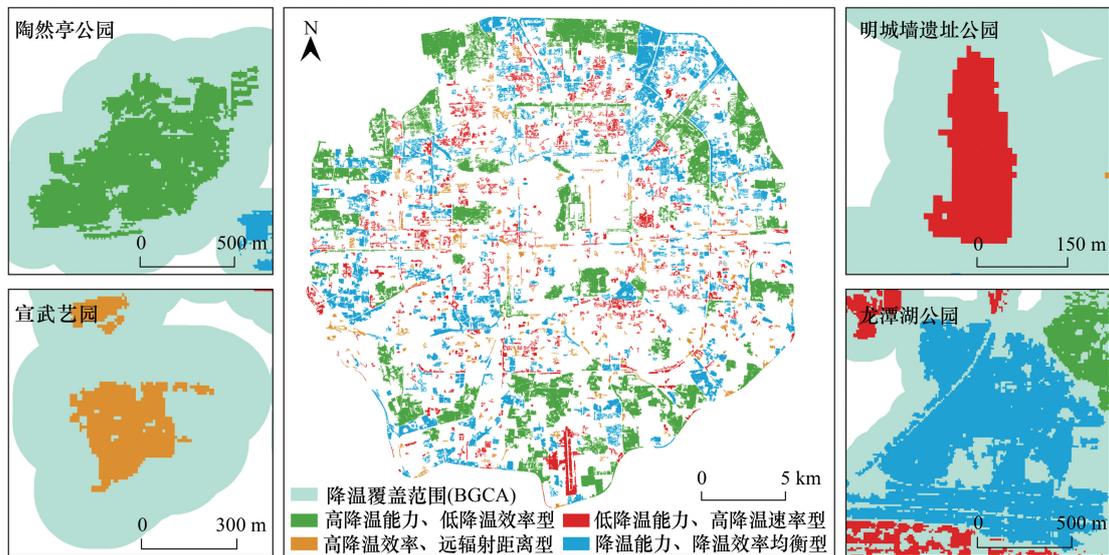


图6 4类蓝绿空间的空间分布与典型案例

Fig.6 Spatial distribution of 4 clusters of blue-green spaces and classic cases

BGCA:冷岛效应覆盖面积 Cooling area

高降温能力、低降温效率型蓝绿空间数量最少(66个),主要包含综合性公园和少量的风景名胜,多分布于四环与五环周边(图6)。其景观特征为规模最大,周长面积比最小,形状规则,水体占比最高,植被覆盖度最高。冷岛效应方面,这类蓝绿空间本身地表温度最低,具有降温幅度最大、降温服务最好、覆盖范围最广、

辐射距离较远的特征(图7)。虽然这类蓝绿空间的降温效果最好,有助于形成舒适的热环境,但由于其规模巨大,使得降温效率最低。

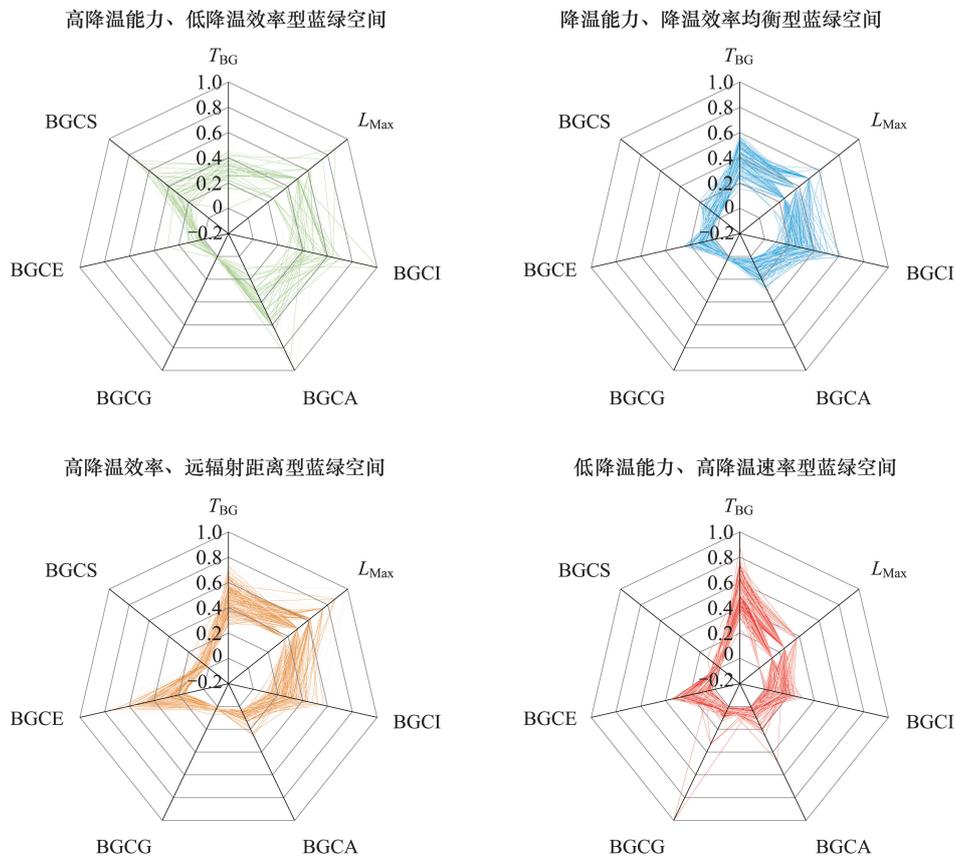


图7 4类蓝绿空间的归一化冷岛效应指标雷达图

Fig.7 Radar charts of 4 types of blue-green spaces normalized cooling effect indicators

T_{BG} : 蓝绿空间地表平均温度 Average land-surface temperature of blue-green space; L_{Max} : 冷岛效应辐射距离 Cooling distance; BGCI: 冷岛效应强度 Cooling intensity; BGCG: 冷岛效应速率 Cooling gradient; BGCE: 冷岛效应效率 Cooling efficiency; BGCS: 冷岛效应服务 Cooling service

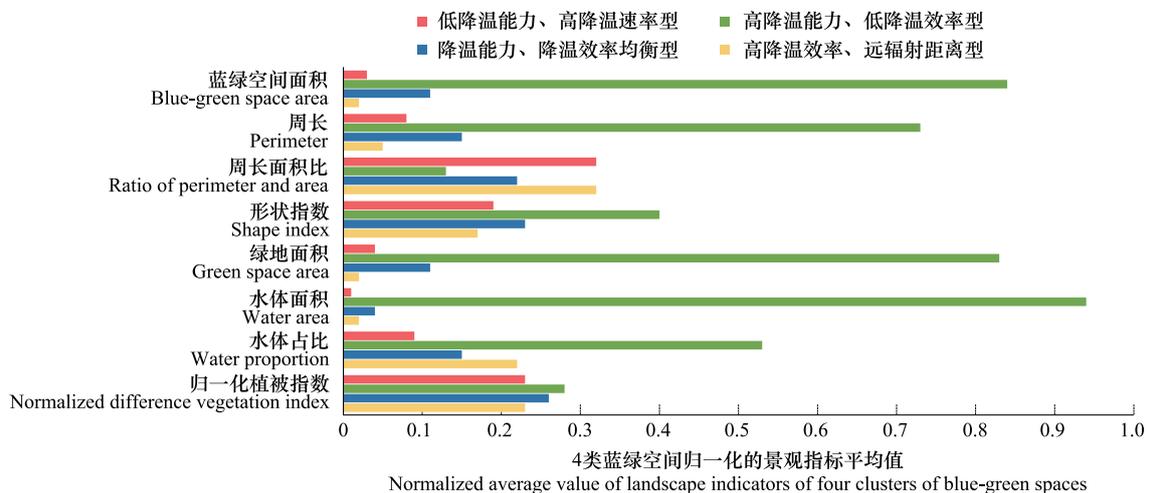


图8 4类蓝绿空间的归一化景观特征条形图

Fig.8 Bar chart of 4 clusters of blue-green spaces normalized landscape characteristics

高降温效率、远辐射距离型蓝绿空间有 246 个,主要包含道路和居住区的小型附属绿地,多分布于二环至四环范围内(图 6)。其具有规模最小(平均仅 3.15hm^2)且边界形状较为复杂,植被覆盖度较低,水体面积虽小,但水体占比高的特点。冷岛效应方面,此类蓝绿空间的降温效率和降温辐射距离表现最好,能够影响较远距离地区的地表温度,具有较高的性价比,其它冷岛指标表现一般(图 7)。

低降温能力、高降温速率型蓝绿空间数量最多,有 504 个,多是分布在二环外的附属绿地和街头绿地(图 6)。这类蓝绿空间是城市中数量最多,与市民接触最频繁的类型,平均面积 4.7hm^2 ,边界复杂破碎,植被覆盖度最低,水体面积和占比也最小。在冷岛效应的降温能力表现上最差,其本身的平均温度甚至高于研究区域平均地表温度 0.15°C ,仅低于不透水下垫面的平均地表温度 1.17°C 。另外,其降温幅度、范围、服务和辐射距离均是 4 类蓝绿空间中最小的,但其降温速率表现最好,能快速降低周边短距离的地表温度(图 7)。

降温能力、降温效率均衡型蓝绿空间的数量仅次于低能高速率型蓝绿空间,有 383 个,主要包含中尺度的公园和部分附属绿地,多分布于二环以外地区(图 6)。其平均面积 14.6hm^2 ,形状规则,水体占比高,有良好的植被覆盖。此外,冷岛效应方面表现均衡,本身的地表温度较低,具有较好的降温幅度和服务,较大的降温范围,较远的辐射距离,良好的降温效率和速率(图 7)。这类蓝绿空间的降温能力、速率和效率表现都不突出,但用地节约,且分布广泛,同时能均衡冷岛效应不同指标之间的关系,具有良好的降温效果。

4 讨论

4.1 蓝绿空间冷岛效应的影响因素

规模方面,蓝绿空间面积(BGA)与冷岛效应的降温幅度(BGCI)呈正相关的对数关系,且存在阈值,这与相关研究结果相似^[54-56]。阈值在不同城市存在差异,如厦门公园的 BGA 阈值在 55hm^2 ^[42],本研究发现北京的 BGA 阈值在 50hm^2 。相似的关系也存在于 BGA 与蓝绿空间平均温度(T_{BG})之间,只是 T_{BG} 会随着 BGA 的增大而降低^[42,57],阈值在 40hm^2 ,可见在 50hm^2 范围内增加 BGA 是高密度城区缓解热岛效应的有效方法之一。本研究中蓝绿空间周长(C_{BG})与降温效率(BGCE)呈显著负相关关系,同样存在阈值(5000m),常州和长春公园的 C_{BG} 阈值为 3600m ^[32]和 2500m ^[58]。

形状复杂度方面,目前对于周长面积比(R_{CA})与冷岛效应的关系还存在不确定性^[9],本研究认为 R_{CA} 越大,蓝绿空间自身温度(T_{BG})越高,降温幅度(BGCI)越低,原因可能是蓝绿空间边界复杂,与周边不同介质的接触面更大,能量交换也更频繁,从而提升了 T_{BG} ,削减了 BGCI,与部分研究一致^[31-32,42],而有的研究认为 R_{CA} 增加会使蓝绿空间的冷岛效应更强^[50]。形状指数(BGSI)与降温覆盖面积(BGCA)存在显著正相关,这是因为形状越复杂,其缓冲区面积就越大,降温覆盖面就越广,与 Chen 等的研究结论一致^[59]。可见舒适的 T_{BG} 、更高的 BGCI 与更大的 BGCA 存在矛盾性,更好的降温效果,需要更加规则的边界,将 R_{CA} 控制在 5 以下;而更大的降温范围,则需要丰富边界,提高 BGSI。

景观组成方面,研究发现水体面积(WA)相较绿地面积(GA)对蓝绿空间冷岛效应的影响更大,与已有研究相同^[60-61]。从高降温效率、远辐射距离型蓝绿空间和低降温能力、高降温速率型蓝绿空间的对比中也能证实,高速率型蓝绿空间规模更大,绿地占比更多,但高效率型蓝绿空间规模更小,水体占比(WP)更大,二者的其他景观特征基本相同。除降温速率外,高效率型蓝绿空间所有的冷岛指标均好于高速率型蓝绿空间。原因是水体的比热容和热阻远大于绿地,热辐射率也较低,能量交换速率慢^[62]。因此,相较通过增加规模提升降温效果的方法,中小规模蓝绿空间以增加 WA 和 WP 的方式提高降温能力更具性价比。另外,WA 与降温幅度也存在阈值,建议 WA 不超过 $7-10\text{hm}^2$ 。

环境组成方面,有研究指出:公园冷岛效应最远辐射距离多分布于 $200-300\text{m}$ 范围内, 100m 内效果最好^[63], 300m 范围内的水体和不透水下垫面对冷岛效应影响显著^[57]。而本研究发现蓝绿空间的最远辐射范围为 270m ,蓝绿空间会与 270m 范围内的其他蓝绿空间产生冷岛效应的协同促进作用,与上述研究部分一致。由此,在高密度城区每隔一定距离(300m 以内)建设相互联系且形成系统的蓝绿空间网络,相较距离远、

相互独立的蓝绿空间点状布局模式更能促进其冷岛效应的发挥。近些年来,各地绿化部门所提倡的“300 米见绿,500 米见园”的均衡性公园绿地布局模式除了保障市民使用蓝绿空间的公平外,也提高了市民享受蓝绿空间所提供的降温服务的公平性。

植被方面,研究发现蓝绿空间 NDVI 对冷岛效应具有相关性,但程度较弱,与 Qiu 等^[31]的研究一致,但与 Chen 等^[59]的研究存在差异。原因可能是 NDVI 具有非线性特征,对观测平台具有较大的依赖性,且无法反应植被的全部情况^[22],而本研究也并未加入全面反应植被情况的多个植被指标,如三维绿量、比值植被指数、绿度植被指数、土壤调节植被指数和植被覆盖度等。但从个案来看,南苑机场、海淀机场与天坛公园形状规则且面积大,但降温效果远低于面积小、植被丰富的日坛公园,从侧面证明不同的植被状态可能会对冷岛效应产生影响。枝叶茂密的乔灌木具有更大的叶面积,植物的蒸腾作用可以降温增湿^[9,62],有助于营造舒适小气候。

最后,许多高密度中心城区已逐步进入“存量”发展阶段,有学者提出“针灸疗法”,北京市也提出“留白增绿”和“见缝插绿”的绿化策略,本质上都是以最小的土地和建设成本,获取最大的生态系统服务。在蓝绿空间规划和建设实施过程中,应注意控制 BGA、WA、 C_{BG} 、 R_{CA} 、BGS1 等指标的大小,不要过多地超过阈值。在热岛集中的地区,集中布置蓝绿空间,减少形状复杂度,可以提高冷岛效应。土地资源紧张地区通过增加水体,选择茂密植被,也能提高蓝绿空间降温能力和降温效率。最后,还要重视蓝绿空间在空间分布上的系统化、体系化和网络化^[64],发挥蓝绿空间网络的生态系统服务协同与促进作用。

4.2 高密度中心城区土地资源与蓝绿空间冷岛效应的博弈与权衡

本研究发现,蓝绿空间规模越大,其降温能力越强,但降温效率越低。许多高密度中心城区仅以增加规模的方式提升冷岛效应,不具备现实可行性,出现了土地资源与蓝绿空间冷岛效应的博弈与权衡的问题。因此,有必要充分认识和利用不同类型蓝绿空间的降温特点,基于建设地区的降温需求,针对性地提升区域蓝绿空间的冷岛效应,增加冷岛供给,以有限的土地资源实现最佳的降温效果。

对于有高降温需求、人口密度大且有足够建设空间(50hm²以上)的城市边缘区,可建设高降温能力、低降温效率型蓝绿空间,类似大型生态公园、郊野公园等。这类蓝绿空间的高降温能力可能得益于其较大的面积和较小的周长面积比:规模较大意味着蓝绿空间内水体和植被较多,二者通过水汽蒸发,提高对周边的降温能力;周长面积比小,意味着与周边接触面少,热交换少,降温辐射能力强。虽然此类蓝绿空间降温能力较高,但降温效率普遍较低^[59],原因可能是随着规模的增加,降温范围也逐渐增大,但降温范围的增加幅度小于面积的增加幅度,导致降温效率逐渐下降。另外,此类蓝绿空间作为绿色基础设施中的大型斑块,除了具有最强降温效应,还能提供维持生物多样性、调节雨洪、污染净化、文化服务、休闲游憩等多样化的生态系统服务,是城市中不可或缺的蓝绿空间类型。

有一定降温需求且可利用空间不足的地区适合高降温效率、远辐射距离型蓝绿空间。这类蓝绿空间规模最小,但水体占比高,植被丰富,具有良好的降温幅度,最远的辐射距离和最高的降温效率。辐射距离最远可能是由于其形状指数较小,形态更接近于规则的圆形,并且水体占比高。有研究指出:蓝绿空间长宽比接近 1,辐射距离最远^[60]。蓝绿空间的形状更加规则,使绿地和水体在空间分布上更集聚,有利于发挥向外的降温辐射效应^[31-32,42],因此影响距离较远。还有研究指出:相较水体占比低于 30%,蓝绿空间水体占比高于 30%的辐射范围更远^[60,65]。由于水体比绿地具有更显著的冷岛效应^[66],水体占比较高使得水汽蒸发更多,与周边热量交换也更多,辐射距离也因此更远。而降温效率最高是因为此类蓝绿空间规模最小、辐射距离最远,使降温覆盖范围与总面积的比值相对较大,因此降温效率高。这类蓝绿空间适合布置在高密度的高端商业区和高档社区周边,在该区域新建或改造蓝绿空间时,应尽量采取集中布置的方式,减小边界的复杂度,可进一步提高蓝绿空间的降温能力。

对于城市中小范围和低强度的微热岛区域,适合低降温能力、高降温速率型蓝绿空间的建设。这类蓝绿空间冷岛效应不强,但降温速率最好,能够快速、有效地降低周边小范围区域的地表温度。高降温速率与蓝绿空间冷岛效应自身特征有关:随着距离增加,蓝绿空间的降温幅度及其变化率均呈减小的趋势,在 100—200m

范围内变化迅速^[60]。而此类蓝绿空间由于周长面积比较大,规模较小,且水体占比少,使其降温能力较低,降温辐射距离也平均不足 100m。在较近的降温辐射距离内有相对较大的降温幅度变化,使得此类蓝绿空间的降温速率较高。但由于降温能力较差,可能会在一定程度上限制此类蓝绿空间的应用。在城市更新和蓝绿空间建设时,可通过减少边界的复杂度、增加地表植被覆盖和水体面积等方式,提高此类蓝绿空间的降温能力。

对于高密度城区内部的人口密集、有较高的降温需求和一定建设空间(10hm²以上)的商业办公区、大型社区、工业区等,可建设中等尺度、能效均衡型的综合性公园、社区公园类的蓝绿空间。相比上述三类蓝绿空间,均衡型蓝绿空间由于在规模、形状复杂度、景观组成等景观特征方面表现较为平衡。因此,其冷岛效应在降温能力、降温效率、降温速率等方面均表现良好,没有特别凸显的降温优势和短板。这类蓝绿空间在景观特征上往往有一定面积的水体和近自然且茂密的城市森林,因而不仅具有良好的降温效果,营造舒适的微气候,还可以提供公众游赏和科普教育,发挥生态系统的文化服务功能。此外,这类蓝绿空间在城市中的分布较为普遍,更应注重发挥与周边其他中小尺度的附属绿地和街头绿地的降温协同与促进作用,通过蓝绿空间网络更好地满足区域的降温需求。

5 结论与展望

本研究量化了蓝绿空间冷岛效应的 7 大表征指标,分析了蓝绿空间的景观及其环境特征与冷岛效应各指标的相关关系,并根据冷岛效应的表现特征将蓝绿空间分为 4 类,探讨各类蓝绿空间在规划建设时,如何更合理地布局,在城市更新时,如何更有效地提高降温能力和效率。本研究得出以下结论:

(1) 蓝绿空间景观特征方面:蓝绿空间的总面积、绿地面积和水体面积与其降温幅度、降温范围和降温服务具有显著正相关关系,与其降温效率和降温速率具有显著负相关关系,总面积和水体面积还与蓝绿空间自身温度呈显著负相关;周长与降温范围和降温服务具有显著正相关关系,与降温效率和速率有显著负相关关系;形状指数与降温范围、降温服务呈显著正相关;周长面积比则与蓝绿空间的地表温度、降温效率呈显著正相关,与降温范围、服务有显著负相关关系。而水体占比、蓝绿空间的 NDVI 与蓝绿空间的冷岛效应各项指标无显著相关关系。

(2) 蓝绿空间环境特征方面:蓝绿空间会与其冷岛效应辐射范围内的其他蓝绿空间产生降温的协同与促进作用,辐射范围内的蓝绿空间总面积与蓝绿空间的降温幅度、降温范围、降温服务和辐射距离呈显著正相关,与蓝绿空间自身的平均温度呈显著负相关。而辐射范围内的蓝绿空间占比、建筑平均高度、建筑占地面积占比、辐射范围的 NDVI 与蓝绿空间的冷岛效应各项指标无显著相关关系。

(3) 部分高密度中心城区土地和资金有限,应重视蓝绿空间的总面积、水体面积的阈值,控制总面积在 50hm²以下,水体面积在 10hm²以下,以获取高性价比的冷岛效应。另外,使蓝绿空间的周长面积比小于 5,会有较好的降温幅度;周长不超过其阈值 5000m,可以获得较高的降温效率。

(4) 4 个具有不同景观特征的蓝绿空间集群具有不同降温优势和特性,高密度中心城区的蓝绿空间布局优化和规划建设应充分考虑区域的降温需求,匹配具有合适降温特性的蓝绿空间类型,实现较小成本投入,获取较大降温效果。

最后,由于技术、数据等的限制,研究中还存在一些不足,需要在未来进一步完善:受植物遮荫、风、湿度等因子的影响,地表温度与人实际的体感温度仍存在差异,未来应将上述因素也考虑进来;其次,本研究并未考虑到人的分布,高密度中心城区的蓝绿空间冷岛效应的提升应以服务于人作为目标。市民是否享受到降温服务?所享受的降温服务是否公平?降温服务是否存在地区差异?这些问题值得深入探究。

参考文献 (References):

- [1] Wang J, Chen Y, Liao W L, He G H, Tett S F B, Yan Z W, Zhai P M, Feng J M, Ma W J, Huang C R, Hu Y M. Anthropogenic emissions and urbanization increase risk of compound hot extremes in cities. *Nature Climate Change*, 2021, 11(12): 1084-1089.
- [2] Yu Z W, Yao Y W, Yang G Y, WANG X R, Vejre H. Spatiotemporal patterns and characteristics of remotely sensed region heat islands during the

- rapid urbanization (1995-2015) of Southern China. *Science of the Total Environment*, 2019, 674: 242-254.
- [3] 葛荣凤, 王京丽, 张力小, 田光进, 冯悦怡. 北京市城市化进程中热环境响应. *生态学报*, 2016, 36(19): 6040-6049.
- [4] 王煜, 唐力, 朱海涛, 麦有全, 何伟彪, 王伟民, 刘凯, 苏红波. 基于多源遥感数据的城市热环境响应与归因分析——以深圳市为例. *生态学报*, 2021, 41(22): 8771-8782.
- [5] 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. *应用生态学报*, 2020, 31(11): 3935-3945.
- [6] Chen S, Zhao J R, Lee S B, Kim S W. Estimation of Relative Risk of Mortality and Economic Burden Attributable to High Temperature in Wuhan, China. *Frontiers in Public Health*, 2022, 10: 839204.
- [7] 吴君乐, 俞敏, 周脉耕, 周纯良, 肖义泽, 黄彪, 许燕君, 孟瑞琳, 赵亮, 胡建雄, 何冠豪, 许晓君, 刘涛, 肖建鹏, 曾韦霖, 郭凌川, 李杏, 马文军. 基于死亡风险的中国不同气温带气温预警阈值研究. *中华疾病控制杂志*, 2021, 25(10): 1139-1146.
- [8] 王美雅, 徐涵秋. 中外超大城市热岛效应变化对比研究. *自然资源遥感*, 2021, 33(4): 200-208.
- [9] Yu Z W, Yang G Y, Zuo S D, Jørgensen G, Koga M, Vejre H. Critical review on the cooling effect of urban blue-green space: a threshold-size perspective. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 49: 126630.
- [10] 吴岩, 贺旭生, 杨玲. 国土空间规划体系背景下市县蓝绿空间系统专项规划的编制构想. *风景园林*, 2020, 27(1): 30-34.
- [11] 黄铎, 易芳蓉, 汪思哲, 韦慧杰, 王世福. 国土空间规划中蓝绿空间模式与指标体系研究. *城市规划*, 2022, 46(1): 18-31.
- [12] 马瑞明, 谢苗苗, 郟文聚. 城市热岛“源-汇”景观识别及降温效率. *生态学报*, 2020, 40(10): 3328-3337.
- [13] 苏王新, 常青, 刘筱, 张刘宽. 城市蓝绿基础设施降温效应研究综述. *生态学报*, 2021, 41(7): 2902-2917.
- [14] 付瑜, 赵红颖, 赵帅阳, 刘思远. 2002—2018 年北京市通州区城市热岛(冷岛)效应时空分异规律及其影响因素. *科学技术与工程*, 2020, 20(23): 9509-9520.
- [15] 梁建设, 白永平, 杨雪荻, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩. 基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应. *环境科学*, 2022, 43(6): 3365-3374.
- [16] Si M L, Li Z L, Nerry F, Tang B H, Leng P, Wu H, Zhang X, Shang G F. Spatiotemporal pattern and long-term trend of global surface urban heat islands characterized by dynamic urban-extent method and MODIS data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, 183: 321-335.
- [17] 杨朝斌, 张亭, 胡长涛, 范吉康, 吉曹翔, 付喜娥. 蓝绿空间冷岛效应时空变化及其影响因素——以苏州市为例. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(3): 677-688.
- [18] 高静, 龚健, 李靖业. “源-汇”景观格局的热岛效应研究——以武汉市为例. *地理科学进展*, 2019, 38(11): 1770-1782.
- [19] Kong F H, Yin H W, James P, Hutrya L R, He H S. Effects of spatial pattern of greenspace on urban cooling in a large metropolitan area of eastern China. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 128: 35-47.
- [20] Srivanit M, Iamtrakul P. Spatial patterns of greenspace cool islands and their relationship to cooling effectiveness in the tropical city of Chiang Mai, Thailand. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, 191(9): 580.
- [21] Brugger P, De Roo F, Kröniger K, Rotenberg E, Tatarinov F, Yakir D, Zeeman M, Mauder M. Contrasting turbulent transport regimes explain cooling effect in a semi-arid forest compared to surrounding shrubland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 269-270: 19-27.
- [22] 崔凤娇, 邵锋, 齐锋, 王誉洁, 张泰龙, 余海盈. 植被对城市热岛效应影响的研究进展. *浙江农林大学学报*, 2020, 37(1): 171-181.
- [23] 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.
- [24] 曾素平, 时琢, 赵梅芳, 刘发林, 王光军, 林杨, 李沁园, 向枝远, 陈小伟, Ogbodo U S. 城市水体对热岛的缓冲性能沿河岸距离的变化规律. *生态学报*, 2020, 40(15): 5190-5202.
- [25] 朱春阳. 城市湖泊湿地温湿效应——以武汉市为例. *生态学报*, 2015, 35(16): 5518-5527.
- [26] 项小云, 杜嘉, 宋开山, 赵博宇, 周昊昊, 郭萍萍, 张丽烟, 胡雅婷. 湿地对福州市热岛效应影响遥感分析. *地球环境学报*, 2021, 12(4): 411-424.
- [27] 陆芊芊, 杨婷, 王自发, 王喜全, 何立涛. 湿地小气候效应特征研究. *气候与环境研究*, 2020, 25(4): 399-409.
- [28] 闫伟姣, 孔繁花, 尹海伟, 孙常峰, 许峰, 李文超, 张啸天. 紫金山森林公园降温效应影响因素. *生态学报*, 2014, 34(12): 3169-3178.
- [29] 魏琳沅, 孙然好. 城市绿地和建筑格局影响热环境的模拟研究. *生态学报*, 2021, 41(11): 4300-4309.
- [30] Pramanik S, Punia M. Assessment of green space cooling effects in dense urban landscape: a case study of Delhi, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2019, 5(3): 867-884.
- [31] Qiu K B, Jia B Q. The roles of landscape both inside the park and the surroundings in park cooling effect. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 52: 101864.
- [32] 王新军, 冯星莹, 陈凯莉, 高吉喜. 城市公园的冷岛效应研究——以常州市为例. *中国环境科学*, 2021, 41(9): 4245-4252.
- [33] Wu C Y, Li J X, Wang C F, Song C H, Haase D, Breuste J, Finka M. Estimating the cooling effect of pocket green space in high density urban areas in Shanghai, China. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, 9: 657969.
- [34] 卓志雄, 吴天杰, 洪长兴, 黄启堂. 热岛效应视角下口袋公园对城市热环境的影响研究. *林业资源管理*, 2022, (1): 95-105.
- [35] Ren Z B, Zhao H B, Fu Y, Xiao L, Dong Y L. Effects of urban street trees on human thermal comfort and physiological indices: a case study in Changchun city, China. *Journal of Forestry Research*, 2022, 33(3): 911-922.
- [36] Cheng X Y, Wei B S, Chen G J, Li J X, Song C H. Influence of park size and its surrounding urban landscape patterns on the park cooling effect.

- Journal of Urban Planning & Development, 2015, 141(3): A4014002.
- [37] 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.
- [38] Yu Z W, Guo X Y, Jørgensen G, Vejre H. How can urban green spaces be planned for climate adaptation in subtropical cities?. *Ecological Indicators*, 2017, 82: 152-162.
- [39] Liu W, Zhao H Y, Sun S B, Xu X Y, Huang T T, Zhu J N. Green space cooling effect and contribution to mitigate heat island effect of surrounding communities in Beijing Metropolitan Area. *Frontiers in Public Health*, 2022, 10: 870403.
- [40] 耿树丰, 任嘉义, 杨俊, 国安东, 席建超. 局地气候区视角下的城市热环境研究. *生态学报*, 2022, 42(6): 2221-2227.
- [41] 刘诗喆, 谢苗苗, 武蓉蓉, 王亚男, 李新宇. 地理单元划分对城市热环境响应规律的影响——以北京为例. *地理科学进展*, 2021, 40(6): 1037-1047.
- [42] 花利忠, 孙凤琴, 陈娇娜, 唐立娜. 基于 Landsat-8 影像的沿海城市公园冷岛效应——以厦门为例. *生态学报*, 2020, 40(22): 8147-8157.
- [43] Yao L, Sun S, Song C X, Li J, Xu W T, Xu Y. Understanding the spatiotemporal pattern of the urban heat island footprint in the context of urbanization, a case study in Beijing, China. *Applied Geography*, 2021, 133: 102496.
- [44] Peng J, Hu Y X, Dong J Q, Liu Q Y, Liu Y X. Quantifying spatial morphology and connectivity of urban heat islands in a megacity: a radius approach. *Science of the Total Environment*, 2020, 714: 136792.
- [45] 北京市规划和自然资源委员会. 北京城市总体规划(2016年-2035年). 北京: 北京市规划和自然资源委员会, 2017.
- [46] Gong P, Liu H, Zhang M N, Li C C, Wang J, Huang H B, Clinton N, Ji L Y, Li W Y, Bai Y Q, Chen B, Xu B, Zhu Z L, Yuan C, Suen H P, Guo J, Xu N, Li W J, Zhao Y Y, Yang J, Yu C Q, Wang X, Fu H H, Yu L, Dronova I, Hui F M, Cheng X, Shi X L, Xiao F J, Liu Q F, Song L C. Stable classification with limited sample: transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017. *Science Bulletin*, 2019, 64(6): 370-373.
- [47] 刘霞, 王春林, 景元书, 麦博儒. 4种城市下垫面地表温度年变化特征及其模拟分析. *热带气象学报*, 2011, 27(3): 373-378.
- [48] Zhao J C, Zhao X, Liang S L, Zhou T, Du X Z, Xu P P, Wu D H. Assessing the thermal contributions of urban land cover types. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 204: 103927.
- [49] Jiménez-Muñoz J C, Sobrino J A, Skoković D, Mattar C, Cristóbal J. Land surface temperature retrieval methods from landsat-8 thermal infrared sensor data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(10): 1840-1843.
- [50] 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.
- [51] Yuan C H, Yang H T. Research on K-value selection method of K-means clustering algorithm. *Multidisciplinary Scientific Journal*, 2019, 2(2): 226-235.
- [52] Liu J, Ma F, Li F. Analysis of heat island intensity in urban blocks using coupled simulation. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 71-78: 1669-1672.
- [53] Allegrini J, Carmeliet J. Simulations of local heat islands in Zürich with coupled CFD and building energy models. *Urban Climate*, 2018, 24: 340-359.
- [54] 袁振, 吴相利, 臧淑英, 吴长山, 李苗. 基于 TM 影像的哈尔滨市主城区绿地降温作用研究. *地理科学*, 2017, 37(10): 1600-1608.
- [55] 赵芮, 申鑫杰, 田国行, 郭煜琛, 何瑞珍. 郑州市公园绿地景观特征对公园冷岛效应的影响. *生态学报*, 2020, 40(9): 2886-2894.
- [56] 冯悦怡, 胡潭宽, 张力小. 城市公园景观空间结构对其热环境效应的影响. *生态学报*, 2014, 34(12): 3179-3187.
- [57] 仇宽彪, 贾宝全, 成军锋. 北京市五环内主要公园冷岛效应及其主要影响因素. *生态学杂志*, 2017, 36(7): 1984-1992.
- [58] 任志彬. 城市森林对城市热环境的多尺度调节作用研究——以长春市为例[D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2014.
- [59] Chen M, Jia W X, Yan L, Du C L, Wang K. Quantification and mapping cooling effect and its accessibility of urban parks in an extreme heat event in a megacity. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 334: 130252.
- [60] 冯晓刚, 石辉. 基于遥感的夏季西安城市公园“冷效应”研究. *生态学报*, 2012, 32(23): 7355-7363.
- [61] 石蕾洁, 赵牡丹. 城市公园夏季冷岛效应及其影响因素研究——以西安市中心城区为例. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(5): 154-161.
- [62] 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.
- [63] 张晓东, 赵银鑫, 马风华, 刘乃静, 张勇, 褚小东, 吴文忠. 基于遥感数据的银川市城市公园对城市热环境降温效应分析. *水土保持通报*, 2021, 41(5): 338-347.
- [64] 赵海月, 许晓明, 周煜. 欧洲典型森林城市发展及趋势研究——对北京森林城市建设的启示. *中国城市林业*, 2018, 16(6): 67-71.
- [65] 苏泳娴, 黄光庆, 陈修治, 陈水森. 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.
- [66] 徐涵秋. 城市不透水面与相关城市生态要素关系的定量分析. *生态学报*, 2009, 29(5): 2456-2462.