

DOI: 10.20103/j.stxb.202308141757

董建权, 彭建. 绿地空间降温效应综述: 景观调控视角. 生态学报, 2024, 44(4): 1336-1346.

Dong J Q, Peng J. Review on cooling effect of greenspace: Perspective of landscape regulation. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(4): 1336-1346.

绿地空间降温效应综述: 景观调控视角

董建权^{1,2}, 彭建^{2,*}

1 北京林业大学园林学院, 北京 100083

2 北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871

摘要: 在全球变暖和极端热事件加剧的背景下, 绿地空间优化已经成为一种有效调控热环境的基于自然的解决方案, 明晰绿地空间的降温过程、效应特征和景观调控作用对区域绿地空间结构和格局优化至关重要。梳理当前景观调控视角下绿地空间降温效应相关的理论、方法与案例, 回顾了植被降温过程。植被通过遮荫、蒸散、固碳、湍流等过程直接或间接地实现降温效果, 但同时受到了大气和土壤含水量、环境温度、风系统等背景气候的影响。从内部视角(绿地景观变化对本地温度的影响)和外部视角(绿地景观对外部区域温度的影响)总结了降温范围、强度、梯度、效率等特点, 分析不同度量指标的空间差异与关键阈值。内部视角厘定降温效应主要模拟区域内土地覆被变化(如造林、植被类型转换等)和植被覆盖度变化的影响; 外部视角强调以绿地景观为中心的距离变化及其温度序列关联的特征曲线。进一步归纳了景观视角下绿地空间对温度的调控途径, 梳理绿地景观组分(景观的类型、结构和规模特征)和空间配置(景观的空间形态和关系特征)对降温效应的影响差异。已有研究表明, 绿地空间的景观组分与温度的关联性结论较为一致, 但关键调控阈值在不同气候和发展水平的区域存在差异; 规则或复杂绿地景观、集聚或离散绿地景观对区域热环境的影响则并未统一, 但空间配置对降温效应的影响通常弱于景观组分。最后, 围绕“机理-阈值-优化”提出未来景观调控视角下绿地空间降温效应研究需要关注绿地空间降温的非线性过程、多目标协同的绿地景观调控机制、面向降温效应提升的绿地空间网络等重点方向。

关键词: 绿地空间降温效应; 景观调控; 城市热岛效应

Review on cooling effect of greenspace: Perspective of landscape regulation

DONG Jianquan^{1,2}, PENG Jian^{2,*}

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

2 Ministry of Education Laboratory for Earth Surface Processes, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: In the context of global warming and exacerbating extreme heat events, optimization of greenspace has become a nature-based solution to effectively regulate regional thermal environment. Deeply understanding the processes, characteristics, and the regulating role of landscape of the cooling effect of greenspace is important for optimizing the spatial structure and pattern of green space. For such proposes, the current theories, methods and cases related to the cooling effect of green space from the perspective of landscape regulation are sorted out. The key cooling processes of vegetation are reviewed at first. Vegetation achieve cooling effect through the processes of shading, evapotranspiration, carbon fixation, and turbulent flow directly or indirectly, which are also affected by the climate background related to atmospheric and soil water content, ambient temperature and wind systems. The cooling range, cooling intensity, cooling gradient and cooling efficiency from the internal perspective (the effect of greenspace landscapes on the local temperature) and the external perspective (the effect of greenspace landscapes on temperature outside the region) are summarized. The cooling effect from the internal perspective is mainly quantified by simulating the impact of land cover changes (such as afforestation,

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (42130505); 国家资助博士后研究人员计划 (GZB20230058)

收稿日期: 2023-08-14; **采用日期:** 2024-01-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jianpeng@urban.pku.edu.cn

conversions of vegetation types) and fractional vegetation cover changes in the region, while the cooling effect from the external perspective emphasizes the relationship curve between the distance changes centered on the greenspace landscape and the corresponding temperature series. The spatial differences and key thresholds of above-mentioned measurement indicators are also discussed in this review. Furthermore, we focus on the approach of landscape regulation on the cooling effect of greenspace in details, and demonstrate the divergent impact of greenspace landscape components (typology, structure and size of landscape) and spatial configuration (spatial morphology and connection of landscape) on cooling effect. Previous studies have shown the dependable correlation between landscape components of greenspace and temperature, but the key thresholds are various in different regions with distinct climate and socio-economic development. The extent where regular or complex greenspace, agglomeration or discrete greenspace affect regional thermal environment are not consistent, but the influence of spatial configuration on cooling effect is usually weaker than that of landscape components. Eventually, according to the framework “mechanism-threshold-optimization”, we proposed that studies on the cooling effect of green space from the perspective of landscape regulation need to concentrate on several key topics in the future, i.e., non-linear processes of cooling effect, regulating mechanism of greenspace for multi-targets synergy, and greenspace networks for improving cooling effect.

Key Words: cooling effect of green space; landscape regulation; urban heat island

在全球气候变化和城市化背景下,区域极端热事件的强度、频率和持续时间显著增强^[1-2]。城市温度高于郊区温度即城市热岛效应^[3-4],进一步加剧了城市人口热暴露,对社会经济系统产生了重要胁迫。面向热环境适应和极端热缓解,人工措施和生态空间调控成为了重要途径。人工措施主要通过采用高反照率材料、调整涂料颜色等方式直接改变地表对太阳辐射的吸收量^[5],从而起到降低地表和环境温度的作用。生态空间调控作为一种绿色经济的基于自然的解决方案,除了能够缓解城市热岛效应和极端热外^[6-8],还能够协同促进多类其他生态系统服务惠益,如碳固定、水源涵养、空气质量提升、满足休闲游憩需求等^[9-10]。绿地空间和水体作为生态空间的重要组成部分,对区域热环境的调控作用存在差异,已有研究表明水体在夜晚可能出现增温特征,而绿地空间对局地及一定范围内热环境的缓解作用在季节、昼夜变化中波动较小^[11],因而绿地空间降温效应的过程、评估、影响要素得到了广泛关注。

美国环境保护署定义绿地空间为被林草灌或其他植被部分或者全部覆盖的土地,这一术语在城市热岛效应及其缓解的相关研究中应用较多。绿地空间降温效应主要基于植被遮荫作用削减地表对太阳辐射的吸收、蒸散作用通过潜热交换冷却周围环境、光合作用通过吸收二氧化碳缓解温室效应、局部湍流运动实现显热交换等重要降温过程实现^[12-13],这些降温过程受到了背景气候条件的显著影响。已有研究分别从内部视角(绿地景观变化对本地温度的影响)和外部视角(绿地景观对外部区域的降温作用)厘定了绿地空间的降温效应,明晰并逐渐完善了降温范围、降温强度、降温梯度、降温效率等常用评估指标的算法及含义,揭示了不同气候背景和社会发展水平区域的降温差异性,但降温效应的非线性过程较为复杂,特别是外部视角下降温效应厘定仍然以数理方法探寻差异化规律为核心途径。

景观视角下厘清绿地空间降温效应的关键调控要素,能够有效支撑面向热环境缓解的绿地空间结构和格局优化。以往研究主要从景观组分和空间配置两个方面分析其对绿地空间降温的调控作用,核心关注植被类型与生长状况、绿地斑块比例或面积、景观形状特征、破碎度或聚集度等指标评估及阈值识别^[14-15],但区域间研究结论差异显著,尤其表现在空间配置即规则或复杂的空间形态、集聚或离散的空间关系对区域温度的影响。此外,区域性差异和保护目标差异为优选绿地景观格局和结构的关键阈值带来权衡困难,尚缺少面向降温效应增强的格局优化理论与实践研究。

本文旨在梳理当前绿地空间降温效应相关的理论基础、评估方法与案例,回顾植被遮荫、蒸散等关键降温过程及其对背景气候的响应,总结了基于降温范围、降温强度、降温梯度、降温效率等指标,从内部视角和外部

视角厘定绿地空间降温效应的研究思路与核心结论,对比不同区域热环境对绿地空间响应的关键阈值,进一步地梳理景观组分和空间配置对绿地空间降温效应的调控作用和影响差异,进一步提出未来在绿地空间降温机理探究、阈值识别以及格局优化等方面的重点研究方向。

1 植被降温过程与机理

植被主要通过遮荫和蒸散两种途径实现对局地热环境的冷却作用。一方面,遮荫作用主要体现在植被能够在太阳辐射到达地表前,直接反射和吸收部分太阳辐射,从而降低了地表对短波辐射的吸收^[16];另一方面,植被蒸散通过水的相变实现潜热交换,这一过程以吸收周围环境温度为条件,从而降低了近地表温度^[17-19]。同时,二氧化碳作为温室气体,在吸收地表长波辐射而进一步形成大气逆辐射过程中起到重要作用,植被通过光合作用吸收二氧化碳的固碳过程,能够有效缓解这种温室效应^[20]。除此之外,局部湍流通过提高热传递效率也能够起到冷却作用。

植被降温过程受到背景气候调控作用显著,如大气和土壤含水量、环境温度、风系统等^[21]。在分析美国城市热岛强度与年均降水的关系中发现,年均降水增加促进植被茂密生长,降低空气动力学阻抗,从而增强了对流散热效率,降低局地温度^[22]。但是降水在城市植被覆盖调控城市热岛中起非线性作用,在年均降水低于 1000 mm 的区域植被降温策略更加有效^[23]。有研究发现温带季风气候区和地中海气候区城市相对湿度与降温强度、范围、效率均呈现不同程度的负相关关系^[24],这也进一步解释了随着湿度增加,大气与植被间的水汽压梯度降低,抑制了植被潜热交换,从而削弱了植被对局地热环境的冷却。

环境温度的改变直接影响了植被与大气间的感热交换。在北京五环内通过监测空气和不同景观类型在温度、感热通量上的小时与季节差异发现,随着空气温度与植被表面温度差的增加,感热交换也会增强^[25]。此外,高温环境也可能抑制植被蒸腾从而削弱其降温作用。风系统对植被降温作用一方面体现在随着风速增加近地表湍流增强,热传递效率提高;另一方面,水平风向能够搬运走叶片周边饱和水汽,进一步加大植被与大气间饱和水汽压差从而促进由蒸散作用带来的降温效益^[16]。在低风速城市环境中,植被区域与周围不透水表面形成热量流动,冷空气被运输到高温环境中;而在城乡尺度上,郊区生长繁茂的植被产生的局地冷空气与城市内部温度较高的空气也会形成类似的风系统。

2 绿地空间降温效应厘定

绿地空间作为以植被为主要覆被的自然或半自然景观,基于植被的降温过程与机理,当前绿地空间降温效应的研究方法主要包括内部和外部两个视角,内部视角关注绿地空间变化对其所在区域内整体温度降低的强度、效率等,外部视角强调绿地景观对其所在空间外部降温的关键作用,除和内部视角一样关注强度和效率外,也进一步厘定降温范围、降温梯度等关键指标(图 1)。

2.1 内部视角

内部视角下绿地空间降温效应的本质是绿地景观变化对区域内本地温度的影响评估。一方面通过模拟区域内土地覆被变化,如造林、植被类型转换等量化局地温度的改变^[26]。全球尺度的分析表明,低纬度造林引起的降温效应最强,中纬度次之,高纬度可能出现增温特征^[27-28],这主要受到蒸散作用增强引起的降温作用和地表反照率降低导致的增温作用共同调控^[29],中低纬度区域的蒸散强度响应更为显著。另一方面,内部视角厘定降温效应关注植被覆盖度变化,已有研究主要明晰了随单位植被覆盖度增加或减少的温度变化量,如在美国的分析结果表明 118 个城市中每增加 1% 的植被覆盖度,区域温度平均降低 0.168℃ (0.04—0.574℃),而高降温效率主要表现在阔叶和混交林区^[30]。从内部视角分析植被覆盖变化对局地温度的影响存在明显的区域差异性,如深圳、广州、北京、上海的降温效率分别为 0.023℃、0.03℃、0.078℃、0.06℃,受到了植被类型、背景气候乃至研究尺度差异的影响。

2.2 外部视角

外部视角下的降温效应本质是特定绿地景观对外部区域温度的影响评估,该视角下的分析基础是基于站

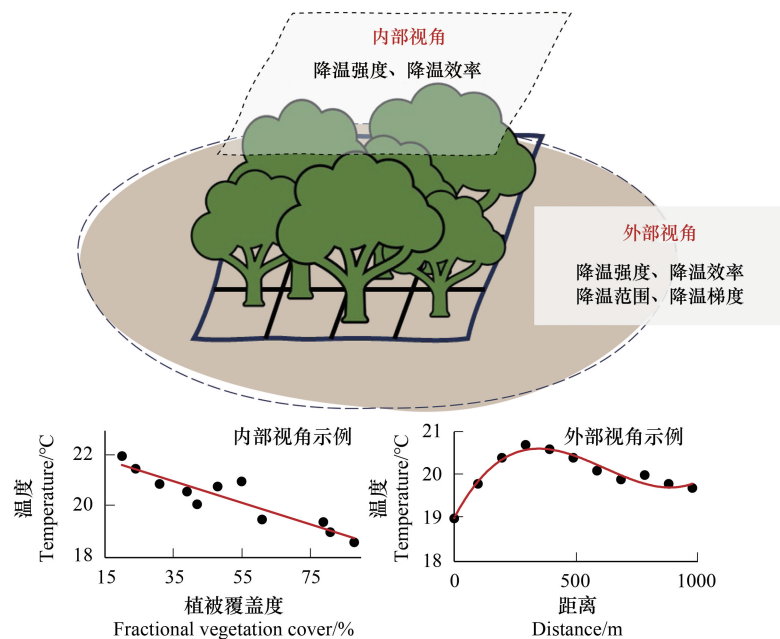


图1 绿地空间降温效应厘定视角

Fig.1 Perspectives of quantifying cooling effect of green space

点观测、遥感反演和模型模拟数据,通过特定方向提取、多层缓冲区计算的温度序列,和以绿地空间中心或边界为起点的距离序列构建特征曲线^[31—32]。有研究主张通过绘制绿地空间不同外部距离的地表温度,直接找寻温度变化的突变点作为效应厘定的关键阈值^[33]。部分研究采用指数函数、多项式函数拟合温度序列和距离间的非线性关系,但通过上述方法得到的曲线存在前提假设,即突变阈值前的温度随着距绿地景观距离的增加而升高,可能并未真实反映绿地空间对外部的温度异质性影响,仍是一种从离散样本到连续估计的数理分析途径^[34]。深圳市24个城市公园外不同宽度缓冲区平均温度与距离的三次多项式拟合结果表明,部分公园的300m缓冲区拟合效果更好,而部分公园更适合600m缓冲区^[35],同样表明了这种数理分析方法的不确定性。

降温范围、降温强度、降温梯度、降温效率等是外部视角下厘定绿地空间降温效应的常用指标^[36]。降温范围指绿地空间的最大降温距离,即降温惠益有多远的表征^[37]。降温强度指最大降温距离处与绿地空间平均温度或边缘温度的差值,是对绿地空间最大能够降多少度的度量^[38]。降温梯度是降温强度与降温范围的比值,反映了单位降温距离下的降温强度^[39]。已有研究在不同城市不同昼夜、季节视角评估了区域内绿地空间的降温范围、强度和梯度,如对伦敦绿地公园外不同方向连续监测夜间近地表气温,发现绿地空间的平均降温距离为10—328m,平均降温强度为0.32—0.98℃^[40];而在米兰的结果则表明城市绿地白天的降温范围是138m,降温强度为1.22℃。同时,降温范围与降温强度间也并不存在一致性关联,如通过缓冲区计算分析得到上海市绿地空间平均降温范围为570m,降温强度3.02℃,降温梯度6.31℃/km^[39];而在福州的研究揭示了绿地空间更小的降温范围(370m)但更高的降温强度(5.628℃)^[33]。当未厘清降温范围和降温强度的权衡关系时,很难通过绿地空间降温效应的定量评估结果遴选最优绿地斑块规模、构型等实践依据,而降温梯度建立了降温范围和强度的数学关联,能够在一定程度上解决上述问题,但已有研究对降温梯度关注较少。

降温效率指标的提出同样能够明晰绿地空间对外部非线性降温效应的关键景观阈值,其常被定义为单位绿地斑块面积或比例下的降温强度,是对投入到区域内绿地空间降温效益的有效衡量。在上述内部视角的降温效应厘定中,植被覆盖度变化的分析途径也是对降温效率的考量。有研究引入边际效用递减法则,指出降温效率的变化直接体现在降温强度与绿地斑块面积的对数非线性关系上,因而存在1单位绿地斑块面积增加

对应于 1 单位降温强度增加的关键阈值(Threshold Value of Efficiency, TVoE),低于 TVoE 阈值时增加 1 单位的斑块规模会带来大于 1 单位的降温强度,反之亦然^[33]。部分研究基于上述降温效率的厘定方法有效识别了不同区域的最优斑块规模阈值^[41],如以香港、雅加达、高雄、吉隆坡等热湿地区为例,分别识别出的 TVoE 为 0.62hm^2 、 0.62hm^2 、 0.92hm^2 、 0.95hm^2 ^[42]。同时,上述降温强度、梯度等多基于绿地空间外部温度序列和距离的突变点提取,是一种由离散数据到曲线拟合进而找寻最大变化的视角;而从累积视角厘定绿地空间的降温梯度和降温强度,是考虑由绿地空间降温范围内单位距离温度实际变化的累积量与最大降温距离、单位距离背景温度变化的累积量间的关系,从而将一维的阈值视角延伸到了二维的累积视角中^[35]。

3 绿地空间降温效应的景观调控

从绿地空间降温效应的厘定结果来看,区域间降温范围、强度、效率及其对应的绿地斑块规模阈值都存在显著差异,而从景观视角而言,造成这种区域差异的影响因素主要包括景观组分和空间配置两个方面^[43-44],厘清景观组分和空间配置对绿地空间降温效应的调控途径对合理布局绿地景观格局和结构至关重要(图 2)。

3.1 景观组分

景观组分的影响主要体现在植被类型、生长状况、绿地斑块比例或面积三个方面,反映了景观的类型、结构和规模特征^[45]。同等范围的绿地空间会因内部植被类型的演化而表现出差异化的降温效果^[46-47],全球范围内的不同植被类型转换引起的局地降温与增温效应研究表明,农田转变为常绿阔叶林、落叶阔叶林均会产生良好的降温效果,且前者植被类型更优,而热带地区的农田扩张导致局地平均地表温度在 2000 年至 2015 年上升了 0.23°C ^[48]。植被类型间的差异在一定程度上体现在叶片和生理特征上,可以选取植被生长状况的度量指标厘定差异,如归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)等^[49-50],高密度植被通过提高遮荫范围和蒸散能力增强区域温度削减效果。通过分析悉尼 34 类绿色基础设施发现,绿色基础设施夏季白天平均地表温度与 NDVI 呈现显著负相关($r = -0.661$, $P < 0.0005$)^[11]。植被类型及其生长状况对绿地空间降温的调控作用有助于在有限的空间范围内选择合适的树种以提升降温效果。

绿地斑块比例或面积直接反映了绿地景观规模对局地热环境的调控作用,虽然更大规模的绿地景观能够提供更加稳定的微气候并替代热源空间,但在城市空间受限条件下,研究逐渐关注绿地斑块占比或面积的最优降温阈值、最小降温阈值等^[51-53]。前文所述的 TVoE 则是从降温效率视角遴选最优绿地斑块面积的阈值,如在京津唐地区的分析发现,唐山市最优斑块面积为 0.27hm^2 ,而北京市和天津市的最优斑块面积分别为 0.47hm^2 和 0.48hm^2 ^[24]。在香港高密度街区通过模拟不同树木覆盖下环境温度的变化发现,当树木覆盖比例大于 20%—30%时,绿地空间的降温效应将会不再显著,环境温度变化平稳^[54]。而在麦迪逊基于连续时序的气温监测发现,冠层覆盖比例对区域降温的影响同时受到不透水表面的影响,当区域不透水比例很低($\sim <25\%$)时,随冠层覆盖比例增加能够实现最高 2.5°C 的降温效果^[55]。同样在麦迪逊的研究发现,绿地空间降温效应会受到其距离水体远近的影响,但当植被覆盖比例大于 60%时,水体空间对绿地空间降温的补偿作用将很微弱^[56]。当前从景观组分视角明晰绿地空间降温效应调控途径的研究,整体上表现的关联性结论较为一致^[57],但关键管控阈值在不同气候背景、发展水平的区域存在差异,因而在制定局地热环境适应策略仍需要考虑差异化设计。

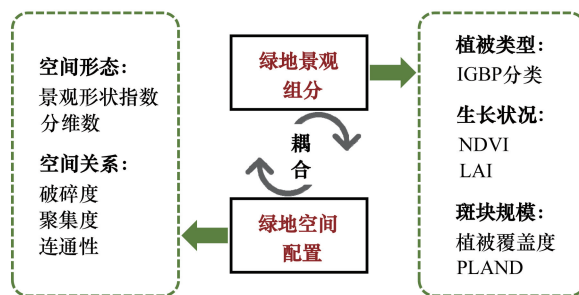


图 2 景观组分和空间配置对绿地降温调控的主要指标

Fig.2 Key indicators of landscape components and spatial configuration on the cooling effect of greenspace

IGBP: 国际地圈生物圈计划 International Geosphere Biosphere Programme; NDVI: 归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index; LAI: 叶面积指数 Leaf Area Index; PLAND: 斑块所占景观面积比例 Percent of Landscape

3.2 空间配置

绿地景观的空间配置对降温效应的调控作用具有明显的区域异质性,已有研究主要从空间形态和空间关系两个方面分析空间配置的影响。一方面核心关注形状规则的绿地景观与形态复杂的绿地景观哪个对区域热环境调控更加有效,常采用如景观形状指数、景观分维数等指标表征^[58-59]。实例研究中,北京市绿地景观形状指数与地表温度的关联分析揭示不同空间形态对区域热环境的影响并没有显著差异^[60],但是新加坡城市绿地空间格局与地表温度的关系揭示了形状复杂度指标如景观形状指数、边缘密度等在不同年份均与地表温度呈现显著正相关^[61]。在福州的案例研究表明,景观形状指数和分形维数与绿地景观降温效率呈现显著负相关,提出绿地景观形状越复杂降温效应越差的结论^[33]。与规则景观相比,复杂的边界会增加绿地与周边热环境的空间接触从而增强热量交换^[62],但景观复杂性的影响在绿地规模影响下存在阈值,例如有研究在哥本哈根对蓝绿斑块规模进行分类,发现当斑块小于 1hm^2 时,景观形状指数与斑块平均地表温度呈现显著正相关,即形状越规整降温效果越好,而当斑块大于 1hm^2 时,复杂的蓝绿斑块能够更好地调控区域热环境^[63]。绿地斑块的形状差异与复杂度对温度的差异性影响也与其他多种因素关联,例如线性景观由于存在树种单一、垂直结构简单等缺点,面对热环境可能更加脆弱^[12]。通过控制其他景观变量或对不同类别属性的绿地景观分析空间形态对降温效应的调控作用在未来研究中仍有待进一步深入。

除了空间形态,已有研究同样关注更加集聚的绿地景观与更加分散的绿地景观哪个对区域热环境调控更有效,常应用边缘密度、破碎度、集聚度等景观指数。在深圳的绿地空间(植被覆盖度大于 45%)聚集度与地表温度的相关分析表明,具有集聚特征的景观格局能够更好地缓解局地的热环境^[64];而有研究发现城市绿地斑块的边缘密度与地表温度在春季和夏季均呈现显著负相关,表明绿地斑块越破碎、降温效果越好^[65]。进一步地,通过模拟植被降温关键过程即遮荫作用也能够解释斑块空间关系的调控作用,即固定斑块总面积,多数离散绿地斑块和少数集聚绿地斑块的遮荫面积存在明显差异,随着斑块数量的增加累积遮荫面积也随之增强^[66]。整体而言,景观视角下绿地空间降温效应的影响因素多样,作用关系与核心结果也缺乏一致性特征,为了能够在区域生态空间规划中科学纳入热环境调控途径,已有研究从不同认知维度识别了关键景观组分或空间配置阈值,但如何权衡这些阈值的区域和目标差异性仍值得关注。

3.3 贡献差异

由于绿地空间的景观组分和空间配置对降温效应的调控作用存在差异,已有研究通过不同方法量化了两类因素对温度影响的相对重要性,旨在通过关联景观组分和空间配置,更加明确地厘定区域热环境调控的首要因子。通过相关分析直观地明晰景观组分和空间配置与温度的独自关联,如新加坡 1991 年到 2015 年多个景观组分和空间配置指数与绿地空间平均地表温度的相关性表明,绿地景观占比相关性最强,边缘密度、景观形状指数、聚集度指数等空间形态和关系因子的相关性次之^[61]。虽然相关性计算结果简单直接,但缺少对多类型因素共同作用绿地空间降温效应时的贡献解耦分析。通过逐步回归和相对重要性计算发现,北京市街区尺度上春季、夏季和秋季地表温度主要受到绿地空间占比的影响,而在冬季则主要由林地斑块边缘密度(降温)和草地景观形状指数(增温)调控^[67]。景观组分和空间配置对温度调控的季节性差异在其他地区也同样存在,如广州市的多等级绿地空间分析结果显示,夏季和秋季的主导和次要调控因子表现出较为一致的结论,分别为绿地景观百分比和边缘密度^[68]。此外,两种景观调控途径的差异性也同样体现在不同背景气候的城市中,如在美国巴尔的摩(亚热带海洋气候)和萨克拉门托(地中海气候)通过方差分解厘定植被覆盖和空间配置对地表温度的独立影响和综合影响,发现巴尔的摩市地表温度由植被覆盖因子主导而萨克拉门托市则由空间配置因子主导,其归因于两个城市的主导因子分别主要影响了蒸散作用和遮荫作用的降温过程,而蒸散和遮荫对背景气候的敏感性存在差异^[69]。综上,景观组分和空间配置对绿地空间降温效应的调控作用存在相对重要性差异,这种差异也在不同季节、背景气候等条件下突显,未来仍要权衡不同调控作用、协同各类保障目标,推进区域绿地空间的结构和格局优化。

4 研究展望

回顾绿地空间降温效应的厘定和景观调控相关研究进展,当前研究在绿地空间降温效应形成机理、关键景观阈值的目标差异性、面向降温效应增强的格局优化理论与实践等方面仍存在不足。因此,本文提出明晰绿地空间降温效应的非线性机理、识别多目标协同的绿地景观调控关键阈值、构建面向降温效应提升的绿地空间网络等重点研究方向(图3)。

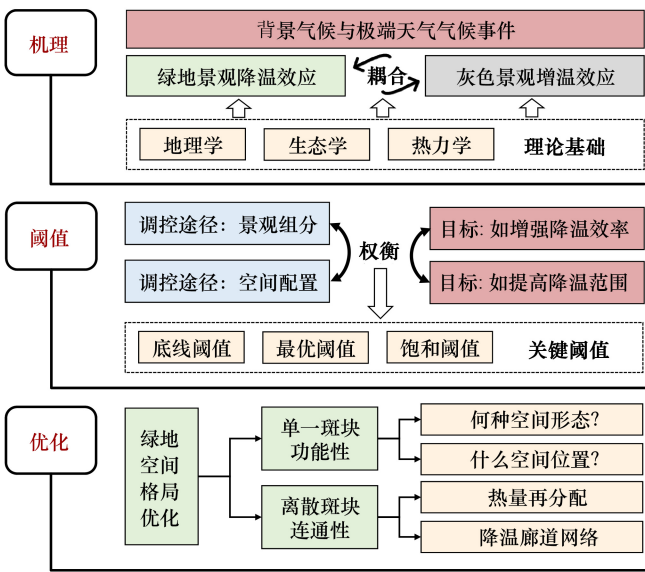


图3 景观调控视角下绿地空间降温效应研究展望

Fig.3 Research directions of cooling effect of green space from the perspective of landscape regulation

4.1 明晰绿地空间降温效应的非线性机理

由于城市或区域是一个复杂的动态系统,绿地空间降温效应的形成不仅依赖于植被降温过程,同时受到了包括不同热源、背景环境、极端天气气候事件的共同作用,特别是城市或区域尺度中关键要素和过程对绿地空间降温的非线性影响机理仍未完善。以外部视角厘定绿地空间降温效应为例,以往研究已经对随到绿地景观距离的增加而温度逐渐升高形成共识,但对温度与距离间的非线性过程刻画尚存在差异,原因在于传统方法仍主要以绿地景观单一对象为中心,基于离散采样数据拟合曲线,但绿地景观外部热环境的形成同样受到了增温要素影响,通常绿地景观与建筑物或其他不透水地表共同作用形成了区域热环境^[19],当前基于统计分析的结果仍缺乏充足的地理学、生态学、热力学等理论基础,如何从动态过程视角如热量传递、风系统特征等解析非线性影响过程并进一步分析传统数理方法的不确定性仍有待深入探究^[70–72]。另一方面,随着区域极端热事件强度与持续时间的显著增强,绿地空间降温效果也取决于植被对极端高温环境的响应,气孔与土壤水限制会削弱绿地降温能力,而饱和水汽压增加会增强绿地降温能力^[13],这种差异化影响机制在不同城市或区域如何非线性地调控热环境仍有待进一步明晰。深化绿地空间降温效应的非线性机理能够为未来识别关键景观调控阈值、应对极端天气气候事件、优化绿地空间布局提供更加充分的科学理论和方法支撑。

4.2 识别多目标协同的绿地景观调控关键阈值

基于降温范围、强度、效率等重要绿地空间降温效应度量指标,识别绿地景观组分和空间配置等不同调控要素的关键阈值,能够直接服务于面向区域热环境适应和极端热缓解的绿地空间优化^[73–74]。但面向不同调控对象或目标时,仍存在影响机制和阈值的矛盾,如绿地斑块规模的增加可能会降低绿地空间内部的离散程度^[66]、保障绿地空间更大降温范围的同时可能会削减降温强度^[75],因而如何权衡不同调控途径的影响,协同多重保障目标以明确绿地景观管控的关键阈值,应成为未来绿地空间降温阈值研究的重要方向之一。同时,

关键阈值识别方法和结果也依赖于调控要素与降温表征指标间的非线性特征^[76],需要关注是否存在能够有效实现高温缓解的底线阈值、最优阈值或饱和阈值。以绿地斑块规模和降温效率的关系为例,TVoE 识别则是“成本-效益”视角下对最优阈值的考虑,即权衡绿地面积与降温边际效益^[42],但忽视了对底线阈值和饱和阈值的关注,特别是针对生态空间有限或者充足的不同区域时,保护目标可能是至少或至多产生绿地空间的累积降温效益,此时底线阈值或饱和阈值在绿地空间规划中更具实践价值。因此,面向不同自然本底和社会经济条件的区域绿地空间特质,需要协同差异化保护目标识别有效的绿地景观调控阈值。

4.3 构建面向降温效应提升的绿地空间网络

景观组分和空间配置视角下绿地降温的非线性过程和关键阈值识别能够为绿地空间降温效应的景观调控途径提供科学支撑,但尚缺乏面向降温效应提升的格局优化理论与实践。具体而言,未来研究首先要关注单一绿地斑块的功能性,即绿地空间应该以何种形态呈现、不同类型斑块应该布局到什么样的空间位置^[77-78]。有学者改进中心地理论构建了一个由生态、高效、基础三种类型绿地斑块组成的城市热安全格局^[79],但该模型为理想化设计,特别是对绿地空间布局较为成熟的城市而言,重新配置绿地景观组分与构型的可行性仍有限;区别于建立绿地网络,研究从反向思维构建城市热岛网络,强调打破连接热岛源的关键节点和廊道能够有效缓解城市热岛效应^[80-81]。未来研究还需关注离散绿地斑块的连通性,即已有绿地空间如何通过降温廊道构建网络化格局。虽然在以往基于生态系统服务提升的绿色基础设施、生态安全格局等研究中,已有对网络化生态空间的识别方法^[82],但对城市热岛效应和极端热缓解这一重要生态系统服务的有效性仍值得探究。此外,更需要明晰绿地空间网络构建的方法基础,是应该侧重基于破碎斑块整合的景观规划理论还是前文所述的基于热量传递、风系统等过程影响下的绿地降温非线性机理。因此,未来研究既要从多目标协同视角强调绿地斑块空间形态和位置优化,也要深化离散绿地斑块连通的理论认知和空间识别途径。

参考文献 (References):

- [1] Fischer E M, Sippel S, Knutti R. Increasing probability of record-shattering climate extremes. *Nature Climate Change*, 2021, 11(8): 689-695.
- [2] Thompson V, Kennedy-Asser A T, Vosper E, Lo Y, Huntingford C, Andrews O, Collins M, Hegerl G, Mitchell D. The 2021 western North America heat wave among the most extreme events ever recorded globally. *Science Advances*, 2022, 8(18): eabm6860.
- [3] Manoli G, Fatichi S, Bou-Zeid E, Katul G G. Seasonal hysteresis of surface urban heat islands. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(13): 7082-7089.
- [4] Stewart I D, Krayenhoff E S, Voogt J A, Lachapelle J A, Allen M A, Broadbent A M. Time evolution of the surface urban heat island. *Earth's Future*, 2021, 9(10): e2021EF002178.
- [5] Akbari H, Kolokotsa D. Three decades of urban heat islands and mitigation technologies research. *Energy and Buildings*, 2016, 133: 834-842.
- [6] Peng S S, Piao S L, Ciais P, Friedlingstein P, Ottle C, Bréon F M, Nan H J, Zhou L M, Myneni R B. Surface urban heat island across 419 global big cities. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(2): 696-703.
- [7] Sun R H, Chen L D. Effects of green space dynamics on urban heat islands: mitigation and diversification. *Ecosystem Services*, 2017, 23: 38-46.
- [8] Wang W, Shu J. Urban renewal can mitigate urban heat islands. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(6): e2019GL085948.
- [9] 陈康林, 龚建周, 陈晓越, 李天翔. 广州城市绿色空间与地表温度的格局关系研究. *生态环境学报*, 2016, 25(5): 842-849.
- [10] Keeler B L, Hamel P, McPhearson T, Hamann M H, Donahue M L, Meza Prado K A, Arkema K K, Bratman G N, Brauman K A, Finlay J C, Guerrey A D, Hobbie S E, Johnson J A, MacDonald G K, McDonald R I, Neverisky N, Wood S A. Social-ecological and technological factors moderate the value of urban nature. *Nature Sustainability*, 2019, 2(1): 29-38.
- [11] Bartesaghi-Koc C, Osmond P, Peters A. Quantifying the seasonal cooling capacity of 'green infrastructure types' (GITs): an approach to assess and mitigate surface urban heat island in Sydney, Australia. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 203: 103893.
- [12] Wong N H, Tan C L, Kolokotsa D D, Takebayashi H. Greenery as a mitigation and adaptation strategy to urban heat. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(3): 166-181.
- [13] Schwaab J, Meier R, Mussetti G, Seneviratne S, Bürgi C, Davin E L. The role of urban trees in reducing land surface temperatures in European cities. *Nature Communications*, 2021, 12: 6763.
- [14] 何介南, 肖毅峰, 吴耀兴, 吴立潮, 康文星. 4 种城市绿地类型缓解热岛效应比较. *中国农学通报*, 2011, 27(16): 70-74.
- [15] Yin J, Wu X X, Shen M G, Zhang X L, Zhu C H, Xiang H X, Shi C M, Guo Z Y, Li C L. Impact of urban greenspace spatial pattern on land

- surface temperature; a case study in Beijing metropolitan area, China. *Landscape Ecology*, 2019, 34(12): 2949-2961.
- [16] Gunawardena K R, Wells M J, Kershaw T. Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Science of the Total Environment*, 2017, 584/585: 1040-1055.
- [17] 王晓娟, 孔繁花, 尹海伟, 徐海龙, 李俊生, 蒲英霞. 高温天气植被蒸腾与遮荫降温效应的变化特征. *生态学报*, 2018, 38(12): 4234-4244.
- [18] Hami A, Abdi B, Zarehaghi D, Bin Maulan S. Assessing the thermal comfort effects of green spaces: a systematic review of methods, parameters, and plants' attributes. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 49: 101634.
- [19] Li D, Liao W L, Rigden A J, Liu X P, Wang D G, Malyshev S, Shevliakova E. Urban heat island: aerodynamics or imperviousness? *Science Advances*, 2019, 5(4): eaau4299.
- [20] Bonan G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 2008, 320(5882): 1444-1449.
- [21] Zhao J C, Meili N, Zhao X, Fatichi S. Urban vegetation cooling potential during heatwaves depends on background climate. *Environmental Research Letters*, 2023, 18(1): 014035.
- [22] Zhao L, Lee X H, Smith R B, Oleson K. Strong contributions of local background climate to urban heat islands. *Nature*, 2014, 511(7508): 216-219.
- [23] Manoli G, Fatichi S, Schl pfer M, Yu K L, Crowther T W, Meili N K, Burlando P, Katul G G, Bou-Zeid E. Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population. *Nature*, 2019, 573(7772): 55-60.
- [24] Yu Z W, Xu S B, Zhang Y H, Jørgensen G, Vejre H. Strong contributions of local background climate to the cooling effect of urban green vegetation. *Scientific Reports*, 2018, 8: 6798.
- [25] Yu Z W, Chen T T, Yang G Y, Sun R H, Xie W, Vejre H. Quantifying seasonal and diurnal contributions of urban landscapes to heat energy dynamics. *Applied Energy*, 2020, 264: 114724.
- [26] Li Y, Piao S L, Chen A P, Ciais P, Li L Z X. Local and teleconnected temperature effects of afforestation and vegetation greening in China. *National Science Review*, 2020, 7(5): 897-912.
- [27] Li Y T, Li Z L, Wu H, Zhou C H, Liu X Y, Leng P, Yang P, Wu W B, Tang R L, Shang G F, Ma L L. Biophysical impacts of earth greening can substantially mitigate regional land surface temperature warming. *Nature Communications*, 2023, 14: 121.
- [28] Li Y, Zhao M S, Motesharrei S, Mu Q Z, Kalnay E, Li S C. Local cooling and warming effects of forests based on satellite observations. *Nature Communications*, 2015, 6: 6603.
- [29] Lee X H, Goulden M L, Hollinger D Y, Barr A, Black T A, Bohrer G, Bracho R, Drake B, Goldstein A, Gu L H, Katul G, Kolb T, Law B E, Margolis H, Meyers T, Monson R, Munger W, Oren R, Paw U K T, Richardson A D, Schmid H P, Staebler R, Wofsy S, Zhao L. Observed increase in local cooling effect of deforestation at higher latitudes. *Nature*, 2011, 479(7373): 384-387.
- [30] Wang J, Zhou W Q, Jiao M, Zheng Z, Ren T, Zhang Q M. Significant effects of ecological context on urban trees' cooling efficiency. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 159: 78-89.
- [31] 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.
- [32] Bao T, Li X M, Zhang J, Zhang Y J, Tian S Z. Assessing the distribution of urban green spaces and its anisotropic cooling distance on urban heat island pattern in Baotou, China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2016, 5(2): 12.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Peng J, Dan Y Z, Qiao R L, Liu Y X, Dong J Q, Wu J S. How to quantify the cooling effect of urban parks? Linking maximum and accumulation perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 252: 112135.
- [36] Chang C R, Li M H. Effects of urban parks on the local urban thermal environment. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2014, 13(4): 672-681.
- [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] Oliveira S, Andrade H, Vaz T. The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: a case study in Lisbon. *Building and Environment*, 2011, 46(11): 2186-2194.
- [39] 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.
- [40] Vaz Monteiro M, Doick K J, Handley P, Peace A. The impact of greenspace size on the extent of local nocturnal air temperature cooling in London. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, 16: 160-169.
- [41] 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.

- [42] Fan H Y, Yu Z W, Yang G Y, Liu T Y, Liu T Y, Hung C H, Vejre H. How to cool hot-humid (Asian) cities with urban trees? An optimal landscape size perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 265: 338-348.
- [43] 李孝永, 匡文慧. 北京、天津和石家庄城市地表覆盖组分与结构特征对地表温度的影响. *生态学杂志*, 2019, 38(10): 3057-3065.
- [44] Connors J P, Galletti C S, Chow W T L. Landscape configuration and urban heat island effects: assessing the relationship between landscape characteristics and land surface temperature in *Phoenix*, Arizona. *Landscape Ecology*, 2013, 28(2): 271-283.
- [45] Richards D, Fung T, Belcher R, Edwards P. Differential air temperature cooling performance of urban vegetation types in the tropics. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 50: 126651.
- [46] 张昌顺, 谢高地, 鲁春霞, 刘春兰, 李娜, 王硕, 孙艳芝. 北京城市绿地对热岛效应的缓解作用. *资源科学*, 2015, 37(6): 1156-1165.
- [47] Teshnehdel S, Akbari H, Di Giuseppe E, Brown R D. Effect of tree cover and tree species on microclimate and pedestrian comfort in a residential district in Iran. *Building and Environment*, 2020, 178: 106899.
- [48] Duveiller G, Hooker J, Cescatti A. The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance. *Nature Communications*, 2018, 9: 679.
- [49] 谢紫霞, 张彪, 余欣璐, 郝亮. 上海城市绿地夏季降温效应及其影响因素. *生态学报*, 2020, 40(19): 6749-6760.
- [50] Dronova I, Friedman M, McRae I, Kong F H, Yin H W. Spatio-temporal non-uniformity of urban park greenness and thermal characteristics in a semi-arid region. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 34: 44-54.
- [51] Kong F H, Yin H W, James P, Hutya 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.
- [52] Peng J, Xie P, Liu Y X, Ma J. Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: a case study in the Beijing metropolitan region. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 173: 145-155.
- [53] Zhou W, Cao F L, Wang G B. Effects of spatial pattern of forest vegetation on urban cooling in a compact megacity. *Forests*, 2019, 10(3): 282.
- [54] Ouyang W L, Morakinyo T E, Ren C, Ng E. The cooling efficiency of variable greenery coverage ratios in different urban densities: a study in a subtropical climate. *Building and Environment*, 2020, 174: 106772.
- [55] Ziter C D, Pedersen E J, Kucharik C J, Turner M G. Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(15): 7575-7580.
- [56] Hu L Q, Li Q. Greenspace, bluespace, and their interactive influence on urban thermal environments. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(3): 034041.
- [57] 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.
- [58] 陈爱莲, 孙然好, 陈利顶. 绿地格局对城市地表热环境的调节功能. *生态学报*, 2013, 33(8): 2372-2380.
- [59] Dugord P A, Lauf S, Schuster C, Kleinschmit B. Land use patterns, temperature distribution, and potential heat stress risk-The case study Berlin, Germany. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2014, 48: 86-98.
- [60] Li X M, Zhou W Q, Ouyang Z Y, Xu W H, Zheng H. Spatial pattern of greenspace affects land surface temperature: evidence from the heavily urbanized Beijing metropolitan area, China. *Landscape Ecology*, 2012, 27(6): 887-898.
- [61] Masoudi M, Tan P Y. Multi-year comparison of the effects of spatial pattern of urban green spaces on urban land surface temperature. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 184: 44-58.
- [62] 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.
- [63] Yang G Y, Yu Z W, Jørgensen G, Vejre H. How can urban blue-green space be planned for climate adaption in high-latitude cities? A seasonal perspective. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 53: 101932.
- [64] Xie M M, Wang Y L, Chang Q, Fu M C, Ye M T. Assessment of landscape patterns affecting land surface temperature in different biophysical gradients in Shenzhen, China. *Urban Ecosystems*, 2013, 16(4): 871-886.
- [65] Li J X, Song C H, Cao L, Zhu F G, Meng X L, Wu J G. Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: a case study of Shanghai, China. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12): 3249-3263.
- [66] Jiao M, Zhou W Q, Zheng Z, Wang J, Qian Y G. Patch size of trees affects its cooling effectiveness: a perspective from shading and transpiration processes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 247: 293-299.
- [67] Yao L, Li T, Xu M X, Xu Y. How the landscape features of urban green space impact seasonal land surface temperatures at a city-block-scale: an urban heat island study in Beijing, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 52: 126704.
- [68] Guo G H, Wu Z F, Cao Z, Chen Y B, Yang Z W. A multilevel statistical technique to identify the dominant landscape metrics of greenspace for determining land surface temperature. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 61: 102263.
- [69] Zhou W Q, Wang J, Cadenasso M L. Effects of the spatial configuration of trees on urban heat mitigation: a comparative study. *Remote Sensing of*

- Environment, 2017, 195: 1-12.
- [70] 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.
- [71] Grunwald L, Schneider A K, Schröder B, Weber S. Predicting urban cold-air paths using boosted regression trees. Landscape and Urban Planning, 2020, 201: 103843.
- [72] Qiao Z, Xu X L, Wu F, Luo W, Wang F, Liu L, Sun Z Y. Urban ventilation network model: a case study of the core zone of capital function in Beijing metropolitan area. Journal of Cleaner Production, 2017, 168: 526-535.
- [73] 焦敏, 周伟奇, 钱雨果, 王佳, 郑重, 胡潇方, 王伟民. 斑块面积对城市绿地降温效应的影响研究进展. 生态学报, 2021, 41(23): 9154-9163.
- [74] 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.
- [75] 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.
- [76] Lin W Q, Yu T, Chang X Q, Wu W J, Zhang Y. Calculating cooling extents of green parks using remote sensing: method and test. Landscape and Urban Planning, 2015, 134: 66-75.
- [77] Xiao X D, Dong L, Yan H N, Yang N, Xiong Y M. The influence of the spatial characteristics of urban green space on the urban heat island effect in Suzhou Industrial Park. Sustainable Cities and Society, 2018, 40: 428-439.
- [78] Zhang Y J, Murray A T, Turner B L. Optimizing green space locations to reduce daytime and nighttime urban heat island effects in *Phoenix*, Arizona. Landscape and Urban Planning, 2017, 165: 162-171.
- [79] Yu Z W, Fryd O, Sun R H, Jørgensen G, Yang G Y, Özdil N C, Vejre H. Where and how to cool? An idealized urban thermal security pattern model. Landscape Ecology, 2021, 36(7): 2165-2174.
- [80] Yu Z W, Zhang J G, Yang G Y, Schlager J. Reverse thinking: a new method from the graph perspective for evaluating and mitigating regional surface heat islands. Remote Sens, 2021, 13: 1127.
- [81] Yu Z W, Zhang J G, Yang G Y. How to build a heat network to alleviate surface heat island effect? Sustainable Cities and Society, 2021, 74: 103135.
- [82] Peng J, Zhao S Q, Dong J Q, Liu Y X, Meersmans J, Li H L, Wu J S. Applying ant colony algorithm to identify ecological security patterns in megacities. Environmental Modelling & Software, 2019, 117: 214-222.