谢启姣,肖声勇.不同环境基质下武汉蓝绿空间景观格局对降温效应的影响[J].华中农业大学学报,2026,45(1):24-36.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.01.003

不同环境基质下武汉蓝绿空间景观格局对降温效应的影响

谢启姣,肖声勇

湖北大学旅游学院,武汉 430062

摘要 为探究蓝绿空间景观结构特征对地表温度(land surface temperature, LST)的影响,更好地发挥蓝绿基础设施的热环境调节功能,基于Landsat 8-9遥感数据对武汉市地表温度进行反演,分析主城区、都市发展区和市域3个基质范围所有常用景观指数与LST之间的定量关系;采用主成分回归分析寻求不同基质条件下影响LST的主导因子,揭示其影响机制。结果显示:水体和绿地表现出明显的"冷岛效应",水体的冷岛强度(8.96～9.34 ℃)明显大于绿地(4.44～5.47 ℃);总体上各景观指数对LST变化的独立解释能力呈现出水体>绿地、景观组成>空间构形、斑块类型水平>景观水平>斑块水平、主城区>都市发展区>市域的规律。不同基质范围蓝绿空间影响地表温度的主导因子不同,主城区依次为水体斑块所占景观面积比例(percentage of landscape, PLAND_W)、水体斑块密度(patch density, PD_W)、绿地有效粒度面积(effective mesh size,MESH_G)和绿地边缘密度(edge density,ED_G);都市发展区依次为水体对比度加权边缘密度(contrast-weighted edge density, CWED_W)、水体斑块所占景观面积比例(contrast-weighted edge density, PLAND_W)、绿地相似度均值(mean similarity index,SIMI_MN_G)和绿地斑块所占景观面积比例(PLAND_G);市域蓝绿空间5个主要景观指数仅能解释35%的LST变化。综合考虑蓝绿空间之外其他景观要素的叠加影响时,水体和建设用地对热环境变化解释能力较强,绿地的降温作用被明显弱化或平抑。蓝绿基础设施影响热环境调节作用的主要因素及其贡献呈现出基质效应,针对不同基质环境进行蓝绿景观空间配置及结构优化,如通过保护主城区内大型水体、保证水系覆盖面积、增加小型水体间的连接性,丰富都市发展区和市域范围蓝绿空间的形态特征、加强其与周围环境的交互频率等,可切实提升蓝绿基础设施的降温效果。

关键词 蓝绿基础设施;热岛效应;冷岛效应;景观格局;基质效应

中图分类号 TU984 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2026)01-0024-13

蓝绿基础设施是由自然或半自然的绿地、水体等地表覆盖所组成的生态网络系统[1-2],可通过蒸腾吸热、阻挡太阳辐射、提供通风廊道等途径降低环境温度、缓解热岛效应[3]。作为一种基于自然的解决方案,蓝绿基础设施以其低成本、高性价比及可持续性等特征[4-5],在调节城市气候、改善热环境方面发挥着不可替代的作用,蓝绿空间的降温效应受到众多研究者的关注[6-7]。公园绿地既有植被覆盖又有水体景观,通常呈现出比周围环境温度更低的现象,即"冷岛效应"[8-9]。前人研究发现,公园绿地的降温效果并不稳定,降温幅度多在1.5～10.0 ℃,降温距离多为100～300 m,有的甚至达到1 000 m[10-12];公园绿地的降温作用主要受到绿地位置、面积、植被覆盖度、空间结构及周边用地特征等因素影响[2,13],布局集中[14]、植被结构多样[15-16]的大型城市公园或林地被证实降温效果更好。越来越多的研究表明,公园绿地内水体面积比例能显著影响公园的降温效果,其对公园降温能力的贡献甚至比植被覆盖更大[17-18]。

近年来,许多学者开始重视城市水体的降温作用及其"冷岛效应"研究,通过城市环境温度与水体温度的差值定义水体冷岛强度。结果发现,城市水体的降温幅度可达5.0～15.0 ℃,对周围环境的降温影响多为200～1 000 m[18-19]。水体的降温效果主要受到水体特性、面积、形状及缓冲区环境特征等因素的影响[1,20-21],但不同研究得到的水体降温效果及主

收稿日期:2025-10-14
基金项目:国家自然科学基金项目(41401186)
谢启姣,E-mail:xieqijiao@126.com

要影响因素差异较大，结果不够稳定。优化蓝绿基础设施布局、提高蓝绿空间的协同降温效应是增强水体降温稳定性和降温效果的有效途径[22-23]，蓝绿空间要素的景观组成、地理位置、形态特征及空间关系被认为是影响地表温度（land surface temperature，LST）变化和降温效果的主要因素[2,20-21]。部分学者选取表征蓝绿基础设施空间特征的景观指数，构建其与地表温度和冷岛强度的数量关系，探讨影响蓝绿空间降温效果的主要因素[6,24]，由于不同研究的区域特征、环境基质及所选景观格局指数不同，得到影响蓝绿基础设施降温效果的主要景观指数也不相同[2,25-26]，甚至出现相反的研究结论[27-28]。

在高度异质化的环境下，需要探讨蓝绿景观配置和空间结构对地表温度的作用机制，查明不同基质环境条件下影响蓝绿空间热环境调节的主导因素，明确基于哪个（些）景观指数、从哪个维度进行蓝绿空间布局优化才能获得更好的降温效果。因此，本研究基于武汉市主城区、都市发展区和市域3种不同环境基质，选取表征蓝绿基础设施空间特征的所有常见景观格局指数，探讨蓝绿空间景观配置和空间构形对降温效应的综合影响，比较不同环境基质条件下蓝绿空间景观格局特征对地表温度影响的差异性，识别对地表温度变化具有相对重要影响的景观因子及其变化特征，明确影响热环境调节的主要因素及其在空间布局优化中的应用途径，以期为科学规划、合理布局不同类型的蓝绿空间、提高蓝绿基础设施的降温效率、有效改善城乡热环境提供依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

武汉市（29°58′～31°22′N，113°41′～115°05′E）属于亚热带季风性湿润气候区，全年四季分明，具有夏热冬冷、降水丰富、热量充足、雨热同期等特点。武汉年平均气温为15.8～17.5 ℃，夏季长达135 d，平均温度在33 ℃以上，历史极端高温达41.3 ℃；年均降水量1 150～1 450 mm，多集中于6—8月，形成了典型的湿热气候。武汉市地处长江中下游平原，江汉平原东部，属于江汉平原向大别山、幕阜山的过渡地带，以平原为主；地势中间低平，南北部为低山丘陵。武汉市内水系发达，长江和汉江在此交汇，河网纵横，湖泊众多，被称为“百湖之市”，是全世界水资源最丰富的特大城市之一。

城市景观结构存在明显的空间异质性，而城市地表温度变化表现出基质效应[21,29]，探讨不同基质条件下景观格局对地表温度的影响有助于更好地理解蓝绿空间的降温效应。“基质”并非单一地表类型，而是指在特定空间范围内，由地表覆盖结构、人类活动强度及热环境背景共同构成的综合环境背景，主城区、都市发展区和市域在建设用地比例、景观破碎度及人为干扰强度等方面存在显著差异，因此被视为3种典型的环境基质类型。本研究分别探讨武汉市主城区、都市发展区和市域蓝绿空间的降温机制和热环境调节作用，空间划分如图1所示。

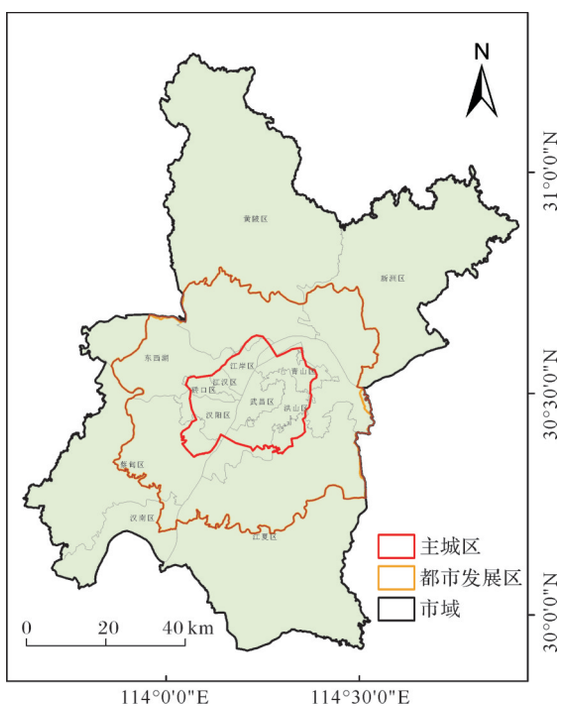


图1　研究区范围

Fig.1　Study area in Wuhan City

1.2　数据来源及预处理

采用美国地质勘探局（USGS，https://glovis.usgs.gov/）的Landsat 8-9卫星影像作为数据源，条带号涉及122/39、123/39和123/38，获取时间为2022年9月18日和19日，影像云量覆盖均小于1%。影像多光谱波段分辨率为30 m，第10、11波段即热波段（TIRS10 and TIRS11）的分辨率为100 m。因本研究所用遥感影像为L1T级别，已完成几何校正和DEM地形校正，在ENVI 5.3软件中对影像进行辐射定标和大气校正[30]，将3幅影像进行拼接，并按照武汉市人民政府网站发布的行政边界对影像进行裁剪。

1.3　热环境特征提取

基于遥感影像进行地表温度反演的方法已经非

常成熟，本研究采用单窗算法计算像元的辐射亮温、地表比辐射率并最终得到像元地表温度[31-32]。在统计研究范围的平均地表温度及其标准差的基础上，采用密度分割法将武汉市主城区、都市发展区和市域分别划分为高温区、次高温区、中温区、次低温区和低温区5个温度等级[33]，其中高温和次高温区域被定义为“热岛”范围，低温和次低温区域为“冷岛”范围。参考热岛强度的定义[34]，将蓝绿要素比周围环境地表温度更低的现象称为蓝绿空间“冷岛效应”[20,35]，冷岛强度界定为一个区域内蓝绿空间平均地表温度与建设用地平均地表温度的差值[12]。

1.4 景观格局指数选取

热场空间分布与地表覆盖类型和下垫面特征密切相关[6,36]，地表温度空间分异受人工或自然地表覆盖特征影响较大。本研究参考前人相关研究[2,6,37]，结合武汉市用地特征及下垫面性质，在ENVI5.3软件中利用最大似然法和人机交互解译法对研究区展开监督分类，将地表覆盖划分为建设用地、绿地、水体和耕地4个类型，针对每种类型随机选取300个样点、采用混淆矩阵对监督分类结果进行精度验证，总体分类精度和Kappa系数分别为98.4%和0.94。考虑到各地表覆盖类型的降温机制及未来蓝绿空间布局优化的可行性，本研究中蓝绿空间主要包括河流、湖泊、池塘等水体空间，以及城市绿地（公园、附属绿地、防护绿地、街头绿地等）、郊野林草地等绿色植被覆盖空间，不包括直接用于农牧生产的旱地和水田等农用地。

为了避免景观指数选取的主观性导致其他重要影响因素被忽略，本研究基于斑块水平、斑块类型水平和景观水平选取表征景观组成和空间构形特征的所有常用景观指数，预实验结果表明，斑块水平景观指数与LST相关系数的绝对值均小于0.1，对研究区地表温度的解释能力有限[37-38]。故本研究主要选取斑块类型水平和景观水平相关指数，包括面积类、密度类、形状类、边缘度类、核心斑块类、邻近度类、聚散性类和多样性类指标共70个，构建地表温度空间分异和蓝绿空间降温效应的潜在影响因子指标体系，在Fragstats 4.2软件中进行格网统计。

1.5 数据分析

景观格局特征与热岛效应的关系及景观指数对LST的解释程度明显受到统计尺度的影响[2,36]。相关研究表明，公园绿地和水体对环境温度的调节作用最远可达1 000 m[11,17,37]，且大多数景观指数在1 000 m×1 000 m尺度下对LST变化的解释效果更好[25]。本研究将研究区按照1 000 m×1 000 m进行格网划分，为减少局地小气候特征的影响，将含有长江、汉江的格网和其他景观类型明显不完整的格网剔除，最终主城区、都市发展区和市域范围有效格网数分别为343、2 317和7 053个。

采用Fragstas4.2软件计算格网内的各景观格局指数值，在SPSS 26软件中构建格网内平均LST与各景观指数的数量关系，进行皮尔逊相关性分析；利用逐步回归法剔除存在共线性、强交互性的景观格局指标，对相关景观格局指数进行主成分回归分析，探究影响地表温度空间分异和蓝绿基础设施降温效应的主导因子，明确贡献程度及影响机制。

2 结果与分析

2.1 武汉热环境空间特征

1）武汉热场空间分布特征。图2为2022年9月18日武汉市地表温度和地表覆盖类型空间分布图。如图2A所示，LST高值区主要分布在武汉钢铁工业基地、武汉经济技术开发区工业园区和天兴洲裸露滩涂等区域，呈现明显的多点“热岛效应”，其中地表最高温为55.89 ℃，出现在武汉钢铁（集团）公司炼钢区；LST低值区则集中分布在长江、汉江、东湖、沙湖、梁子湖、汤逊湖、北部水库等大型水体及黄陂区连片山体或林地，呈现出“冷廊效应”和多片“冷岛效应”，其中地表最低温为22.34 ℃，出现在黄陂郊区大型水库。结合图2B地表覆盖空间结构和表1面积统计值可知，研究区建设用地面积2 354.0 km^2（27.4%），主要集中分布于长江两岸的平原区域；绿地覆盖面积为538.5 km^2（6.3%），主要集中于北部和南部低山林地或零散分布在城区公园；耕地覆盖面积为4 516.3 km^2，占总面积的52.6%，与其他覆盖类型犬牙交错、相互渗透，是研究区地表覆盖的主导景观类型。

将图2A和图2B进行掩膜叠加，发现地表温度分布与地表覆盖类型景观格局呈现出良好的空间耦合规律，总体上，LST高值区与建设用地覆盖范围较为一致，LST低值覆盖区与大型水体和山体林地范围高度吻合。为进一步理解两者的对应关系，对不同地表覆盖类型的LST进行分类统计（表1），水体和绿地平均LST均低于研究区平均值，其中水体平均

LST(27.97 ℃)和标准差(2.02 ℃)值均最小,水体类型温度较低且内部温度较为稳定,总体上对武汉市热环境起到了降温作用。建设用地平均LST(36.31 ℃)则明显高于研究区平均温度(33.08 ℃),其标准差为4.05 ℃,说明建设用地覆盖范围LST值变化幅度较大。

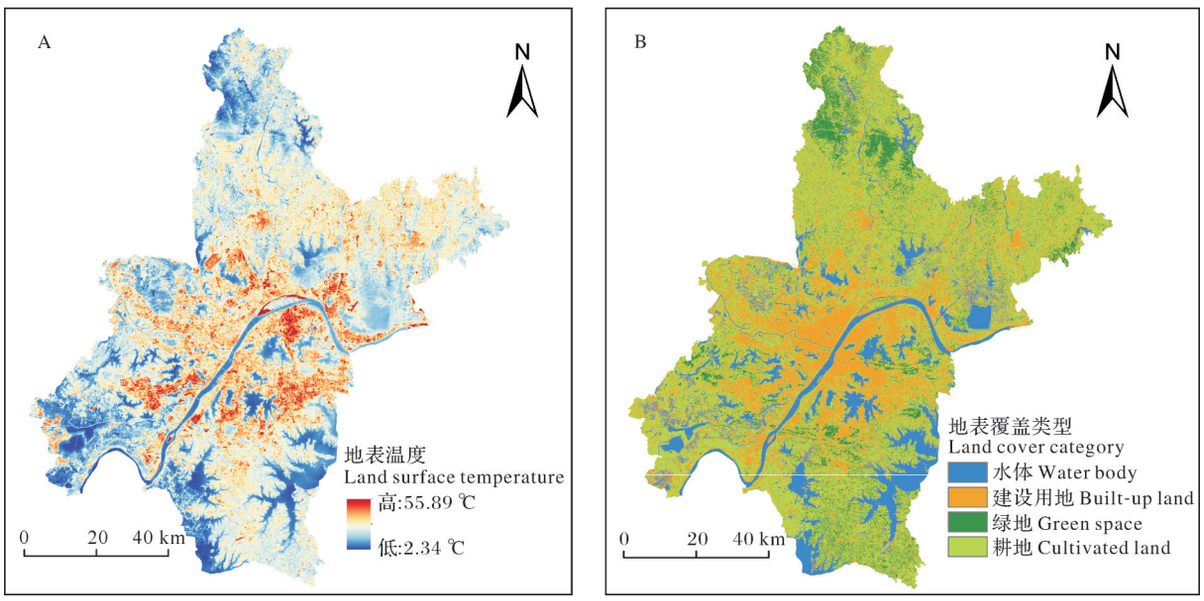


图2　武汉市地表温度(A)及地表覆盖类型(B)分布

Fig.2　Spatial distributions of LST (A) and land cover categories(B) in Wuhan

表1　武汉市地表覆盖类型面积及LST值统计

Table 1　Statistics in area of LST levels in different land cover categories in Wuhan

地表覆盖类型 Land cover category	面积/km² Area	面积占比/% Proportion	最高气温/℃ Maximum temperature	最低气温/℃ Minimum temperature	平均气温/℃ Average temperature	标准差/℃ Standard deviation
水体 Water body	1 174.3	13.7	43.96	22.34	27.97	2.02
绿地 Green space	538.5	6.3	44.79	22.96	31.85	2.37
建设用地 Built-up land	2 354.0	27.4	55.89	22.34	36.31	4.05
耕地 Cultivated land	4 516.3	52.6	50.57	22.53	33.14	2.88
总体 Overall	8 583.1	100	55.89	22.34	33.08	3.98

2)蓝绿空间冷岛效应。为更直观地理解不同基质环境地表覆盖特征与热场空间分布的关系,对武汉市主城区、都市发展区和市域地表温度进行分级,统计不同地表类型的温度等级分布情况(图3)。无论在主城区、都市发展区还是市域范围,90%以上的水体范围被低温或次低温覆盖,高温和次高温覆盖范围则不足0.3%,表现出明显的冷岛特征。总体上,绿地对热环境发挥着重要的稳定或调节功能,“热岛”覆盖范围仅为1.5%~3.5%;但其降温作用有着明显的基质效应,在主城区和市域范围,53.1%和57.8%的绿地范围被低温和次低温级别覆盖,而在都市发展区,仅30.1%的绿地表现出“冷岛”效应。建设用地则主要被高温和次高温覆盖,主城区、都市发展区和市域范围“热岛”区域占比分别为40.2%、61.1%和62.1%,被低温和次低温覆盖比例仅为9.7%、3.3%和9.6%,是研究区的主要热源。

图4列出了不同基质环境蓝绿空间的冷岛强度。同一基质条件下,水体的冷岛强度(8.96~9.34 ℃)都明显大于绿地的冷岛强度(4.44~5.47 ℃),尤其在都市发展区,两者的冷岛强度差值达4.52 ℃,说明水体的降温幅度比绿地更大,降温效果更好;且在不同基

质下水体的冷岛强度均在9 ℃左右，水体的热环境调节能力相对稳定。绿地虽也呈现出明显的“冷岛效应”，但其冷岛强度相对较小，主城区、都市发展区和市域范围分别为5.39、4.44和5.47 ℃；水体和绿地共同组成的蓝绿空间对应的热岛强度分别为8.66、7.25和7.74 ℃。

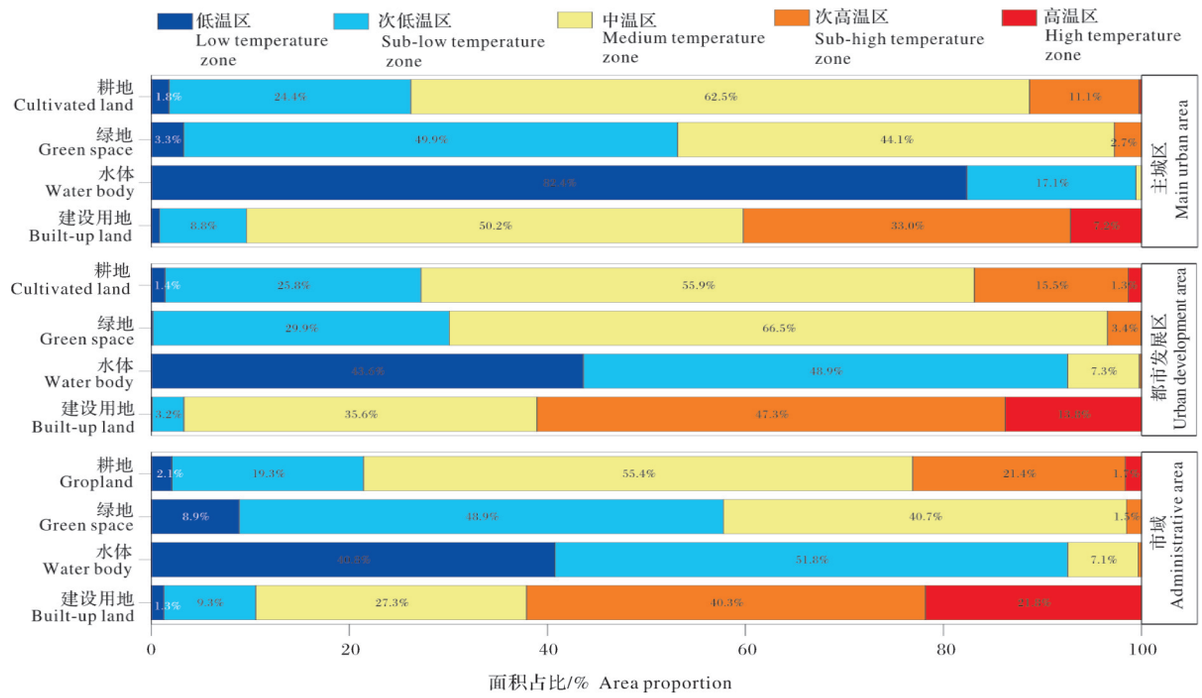


图3 不同地表覆盖类型各LST等级面积占比统计

Fig.3 Area proportion of LST grades in different land cover categories

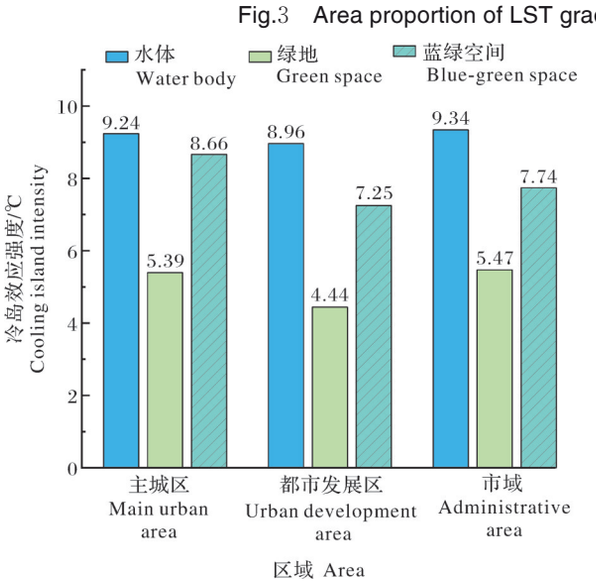


图4 主城区、都市发展区、市域绿地和水体冷岛强度统计

Fig.4 Statistics of cooling island intensity for green spaces and water bodies in the main urban area, urban development area, and the administrative area

2.2 水体和绿地空间特征对地表温度的影响

统计不同基质环境下水体和绿地类型景观指数与LST的相关系数，如表2所示，88.89%的指数统计值与LST呈现显著或极显著相关，只有20组与LST关系不显著。总体上，斑块类型指数与LST的相关系数明显表现为水体>绿地，无论哪种基质环境，水体相关指数比绿地指数对LST变化的解释能力更强；其中不同基质环境水体斑块类型指数与LST的相关系数大多呈现出主城区>都市发展区>市域的规律，绿地斑块类型指数在都市发展区范围与LST相关系数最小，对复杂基质环境地表温度变化的解释能力有限。

水体斑块类型相关的景观指数中，与LST相关系数最高的景观指数均与面积相关，换言之，水体面积相关的景观指数如斑块类型面积(class area, CA_W)、斑块所占景观面积比例(percentage of landscape, PLAND_W)、最大斑块占景观面积比(largest patch index, LPI_W)、核心斑块总面积(total core area, TCA_W)、核心斑块占景观面积比(core area percent of landscape, CPLAND_W)、有效粒度面积(effective mesh size, MESH_W)等与LST呈现高度负相关，表现出明显的温度调节作用，无论在主城区、都市发展区还是市域基质，其相关系数绝对值明显比其他指数与LST的相关系数要高，能更好地解释格网内地表温度的变化；尤其是在主城区，上述景观

指数均能独立解释格网内75%以上的地表温度变化，但其解释能力在都市发展区和市域明显减弱。水体类型形状类指标与LST相关性相对较弱，且在主城区、都市发展区和市域不同环境基质下，对LST变化的解释能力差异较大、不够稳定。水体类型密度指标、边缘指标、邻近度指标、聚散性指标中对LST变化解释力最高且最稳定的景观指数分别是回转半径均值(mean gyration index，GYRATE_MN_W)、边缘密度(edge density，ED_W)、相似度均值(mean similarity index，SIMI_MN_W)和景观分裂指数(division index，DIVISION_W)，但其独立解释能力由主城区、都市发展区到市域基质不断减弱。

表2　蓝绿空间斑块类型水平各指数与LST的相关系数

Table 2　Correlation coefficients between the class level index of blue-green space and LST

指数类别 Index category	指数名称 Index name	主城区 Main urban area		都市发展区 Urban development area		市域 Administrative area	
		水体 Water body	绿地 Green space	水体 Water body	绿地 Green space	水体 Water body	绿地 Green space
面积指标 Area index	斑块类型面积 Class area	−0.854**	−0.208**	−0.750**	−0.080**	−0.596**	−0.268**
	斑块占景观面积比例 Percentage of landscape	−0.866**	−0.204**	−0.766**	−0.088**	−0.602**	−0.278**
	最大斑块占景观面积比例 Largest patch index	−0.840**	−0.203**	−0.727**	−0.098**	−0.523**	−0.250**
	斑块面积均值 Mean patch area	−0.683**	−0.191**	−0.582**	−0.086**	−0.365**	−0.196**
密度指标 Density index	斑块数量 Number of patches	−0.195**	0.071	−0.175**	0.021	−0.341**	−0.240**
	斑块密度 Patch density	−0.167**	0.08	−0.203**	−0.003	−0.351**	−0.253**
	回转半径均值 Mean gyration index	−0.637**	−0.227**	−0.561**	−0.108**	−0.349**	−0.223**
形状指标 Shape index	形状指数 Landscape shape index	−0.171**	0.009	−0.224**	−0.021	−0.380**	−0.292**
	形状指数均值 Mean shape index	−0.093	−0.240**	−0.269**	−0.101**	−0.258**	−0.233**
	分维数均值 Mean fractal dimension index	0.044	−0.221**	−0.125**	−0.085**	−0.198**	−0.184**
	周长-面积比均值 Mean perimeter area ratio	0.429**	0.241**	0.385**	0.068**	0.267**	0.137**
	近圆形形状指数均值 Mean nearly circumscribing circle	−0.033	−0.139**	−0.033	−0.059**	−0.134**	−0.114**
边缘指标 Edge index	对比度加权边缘密度 Contrast-weighted edge density	−0.594**	−0.071	−0.553**	−0.033	−0.528**	−0.397**
	边缘密度 Edge density	−0.606**	−0.117*	−0.538**	−0.062**	−0.531**	−0.313**
	总边缘对比度 Total edge contrast index	0.424**	0.124*	0.121**	0.113**	0.142**	−0.231**
	边缘对比度均值 Mean edge contrast index	0.262**	0.139**	0.078**	0.117**	0.049**	−0.227**
核心斑块指标 Core Area index	核心斑块总面积 Total core area	−0.834**	−0.208**	−0.712**	−0.080**	−0.497**	−0.268**
	核心斑块占景观面积比例 Core area percent of landscape	−0.843**	−0.204**	−0.725**	−0.088**	−0.501**	−0.278**
	独立核心斑块数量 Number of disjunct core areas	−0.399**	0.071	−0.342**	0.021	−0.442**	−0.240**
	独立核心斑块密度 Disjunct core area density	−0.372**	0.08	−0.356**	−0.003	−0.441**	−0.253**
	核心斑块面积均值 Mean core area	−0.674**	−0.191**	−0.571**	−0.086**	−0.354**	−0.196**
	独立核心斑块面积均值 Mean disjunct core areas	−0.726**	−0.191**	−0.591**	−0.086**	−0.399**	−0.196**
邻近度指标 Proximity index	邻近指数均值 Mean contiguity index	−0.453**	−0.263**	−0.401**	−0.065**	−0.279**	−0.145**
	邻近指标均值 Mean proximity index	−0.531**	−0.190**	−0.418**	−0.061**	−0.431**	−0.235**
	相似度均值 Mean similarity index	0.552**	0.373**	0.550**	−0.021	0.408**	0.158**
	有效粒度面积 Effective mesh size	−0.751**	−0.153**	−0.647**	−0.077**	−0.462**	−0.228**
聚散性指标 Connectivity index	连接度指数 Connectance index	−0.294**	0.174**	−0.117**	0.002	−0.143**	−0.051**
	斑块凝聚度指数 Patch cohesion index	−0.520**	−0.206**	−0.522**	−0.080**	−0.411**	−0.184**
	景观分裂指数 Division index	0.754**	0.152**	0.655**	0.080**	0.465**	0.234**
	分离度指数 Splitting index	0.252**	−0.012	0.148**	0.023	0.248**	0.128**

注 Note：*：$P<0.05$，**$P<0.01$。下同。The same as below.

绿地斑块类型水平绝大多数景观指数与地表温度极显著相关($P<0.01$)，但相关系数绝对值普遍小于水体同类指数与LST的关系值，尤其是在景观异质性最高的都市发展区，水体类型指数对地表温度

变化的独立解释程度远高于绿地相关指数。绿地面积类指标、密度类指标、边缘指标、核心斑块指标对应的景观指数与LST的相关系数绝对值为市域>主城区>都市发展区;形状类指标、邻近度指标相关指数及表征水体空间连接度的指数与LST相关系数绝对值为主城区>市域>都市发展区。说明人工基质特征明显的主城区,表征绿地规模及组成的相关指数相对更适合解释地表热场变化;在以自然地表为主导的市域范围,地表温度变化相对更易被绿地的空间关系所影响;而对于地表覆盖特征异质性最高的都市发展区,表征绿地空间特征的景观指数对热环境变化的解释极其有限(相关系数绝对值为0.002~0.117)。

表3为武汉市主城区、都市发展区和市域范围所有水体及绿地景观指数与地表温度的主成分回归方程。主城区范围,蓝绿空间影响格网地表温度的主要因子依次为水体斑块所占景观面积比例(PLAND_W)、水体斑块密度(patch density, PD_W)、绿地有效粒度面积(MESH_G)和绿地边缘密度(ED_G),4个指数共同解释了格网内82.4%的地表温度变化;其中水体斑块所占景观面积比例降温贡献最大,其他因素不变时,水体面积每增加10%,LST值可降低1.1 ℃。都市发展区范围,蓝绿空间主要通过水体对比度加权边缘密度(contrast-weighted edge density, CWED_W)、水体斑块所占景观面积比例(PLAND_W)、绿地相似度均值(SIMI_MN_G)和绿地斑块所占景观面积比例(PLAND_G),4个因子共同解释了59.2%的地表温度变化;其中水体降温的贡献率远大于绿地。市域范围,影响格网地表温度的蓝绿空间景观指数按贡献大小依次为绿地相似度均值(SIMI_MN_G)、水体形状指数(landscape shape index, LSI_W)、水体斑块所占景观面积比例(PLAND_W)、绿地边缘密度(ED_G)和绿地斑块所占景观面积比例(PLAND_G),5个景观指数共同解释了35%的地表温度变化,且5个指数对总体降温效果的贡献差异不大。

表3 蓝绿空间景观指数与地表温度的主成分回归方程

Table 3 Principal component regression equations between landscape index of blue-green spaces and LST

尺度 Scale	类型 Type	回归方程 Regression model	R^2
主城区	标化线性回归方程	$Y'=-0.866X_1-.117X_2-0.167X_3-0.153X_4$	0.824
	一般线性回归方程	$Y=37.437-0.107X_1-0.013X_2-0.278X_3-0.164X_4$	
都市发展区	标化线性回归方程	$Y'=-0.571X_1+0.006X_5-0.704X_6+0.056X_7$	0.592
	一般线性回归方程	$Y=37.415-0.072X_1+0.001X_5-0.196X_6+0.001X_7$	
市域	标化线性回归方程	$Y'=-0.330X_1-0.276X_2-0.380X_8+0.426X_7-0.210X_5$	0.350
	一般线性回归方程	$Y=33.821-0.047X_1-0.023X_2-0.752X_8+0.006X_7-0.049X_5$	

注:Y表示LST,X_1表示PLAND_W,X_2表示ED_G,X_3表示PD_W,X_4表示MESH_G,X_5表示PLAND_G,X_6表示CWED_W,X_7表示SIMI_MN_G,X_8表示LSI_W。 Note: Y indicates LST, X_1 indicates PLAND_W, X_2 indicates ED_G, X_3 indicates PD_W, X_4 indicates MESH_G, X_5 indicates PLAND_G, X_6 indicates CWED_W, X_7 indicates SIMI_MN_G, X_8 indicates LSI_W.

2.3 景观格局对热环境的综合影响

蓝绿基础设施作为城市生态系统的重要组成部分之一,其降温和热环境调节功能发挥会受到其他因素的综合影响,探讨蓝绿基础设施的降温效果时需将其融入不同基质环境,考虑其他地表覆盖类型的交互作用。表4统计了主城区、都市发展区和市域范围景观水平各指数与地表温度的相关系数。相比于斑块类型水平,景观水平与LST在0.01水平上显著相关的景观指数比例明显减少,且相关系数绝对值(基本小于0.45)也较小,说明景观水平相关指数对LST的变化整体解释能力有限,尤其是在都市发展区,大部分景观指数对地表温度的影响几乎可以忽略不计;同一景观指数与LST的相关系数在主城区、都市发展区和市域不同基质条件下差异较大,景观水平格局指数对地表温度的解释能力不够稳定。总体而言,密度类指标、核心斑块指标和多样性指标相关指数均与LST呈现显著相关,且同类别内各指数间差异较小,尤其是各多样性指标相关指数,均与LST显著负相关,同一基质条件下,不同多样性指数与LST的相关系数较为接近;面积类指标、形状类指标、聚散性指标和多样性指标相关的景观指数与LST相关系数大多表现为主城区>市域>都市发展区。具体而言,主城区与LST相关系数最大的指数有边缘对比度均值(mean edge contrast index, ECON_MN)、斑块凝聚度(patch cohesion index, COHESION)、香农多样性(Shannon's diversity index, SHDI)等多样性指标;都市发展区除核心斑块面积(TCA)和多样性指标外,大部分指数与地表温

表 4　景观水平各指数与 LST 的相关系数

Table 4　Correlation coefficients between landscape index at the landscape level and LST

指数类别 Index category	指数名称 Index name	主城区 Main urban area	都市发展区 Urban development area	市域 Administrative area
面积指标 Area index	景观面积 Total area	−0.019	0.119**	0.067**
	最大斑块占景观面积比例 Largest patch index	0.385**	0.103**	0.099**
	斑块面积均值 Mean patch area	−0.228**	−0.01	0.009
密度指标 Density index	回转半径均值 Mean gyration index	−0.410**	−0.077**	0.030*
	斑块密度 Patch density	0.123*	−0.060**	−0.255**
	斑块数量 Number of patches	0.116*	0	−0.234**
形状指标 Shape index	景观形状指数 Landscape shape index	0.014	0.021	−0.025*
	形状指数均值 Mean shape index	−0.336**	−0.001	0.145**
	分维数均值 Mean fractal dimension index	−0.299**	−0.023	0.022
	近圆形形状指数均值 Mean nearly circumscribing circle	−0.262**	−0.092**	−0.044**
	周长/面积均值 Mean perimeter area ratio	0.379**	0.021	−0.064**
边缘指标 Edge index	总边界长度 Total edge	0.004	0.050*	−0.014
	对比度加权边缘密度 Contrast-weighted edge density	0.203**	0.043*	0.175**
	总边缘对比度 Total edge contrast index	0. 447**	0.128**	0.445**
	边缘对比度均值 Mean edge contrast index	0.518**	0.191**	0.386**
	边缘密度 Edge density	0.021	0.005	−0.038**
邻近度指标 Proximity index	邻近指标均值 Mean proximity index	0.074	0.121**	0.354**
	相似度均值 Mean similarity index	0.370**	0.107**	0.038**
	欧式邻近距离均值 Mean euclidean nearest neighbor distance	0.131*	0.031	0.064**
	邻近指数均值 Mean contiguity index	−0.391**	−0.025	0.060**
核心斑块指标 Core area index	核心斑块总面积 Total core area	0.119*	0.320**	0.346**
	独立核心斑块数量 Number of disjunct core areas	0.107*	−0.036	−0.207**
	独立核心斑块密度 Disjunct core area density	0.116*	−0.093**	−0.231**
	核心斑块面积均值 Mean core area	−0.193**	0.045*	0.059**
	独立核心斑块面积均值 Mean disjunct core area	−0.174**	0.100**	0.048**
	核心斑块面积比均值 Mean core area index	−0.06	−0.062**	0.295**
聚散性指标 Connectivity index	蔓延度 Contagion index	0.285**	0.146**	0.210**
	相似邻近比例 Percentage of like adjacencies	−0.022	0.014	0.043**
	聚合度 Aggregation index	−0.058	−0.025	0.029*
	连接度 Connectance index	0.038	0.036	−0.012
	斑块凝聚度 Patch cohesion index	0.437**	0.159**	0.384**
	景观分裂指数 Division index	−0.367**	−0.105**	−0.091**
	有效粒度面积 Effective mesh size	0.338**	0.125**	0.107**
	分离度 Splitting index	−0.331**	−0.080**	−0.203**
多样性指标 Diversity index	香农多样性指数 Shannon's diversity index	−0.424**	−0.195**	−0.264**
	Simpson 多样性指数 Simpson's diversity index	−0.399**	−0.155**	−0.139**
	修正 Simpson 多样性指数 Modified Simpson's diversity index	−0.409**	−0.166**	−0.183**
	香农均匀度指数 Shannon's evenness index	−0.424**	−0.195**	−0.264**
	Simpson 均匀度指数 Simpson's evenness index	−0.399**	−0.155**	−0.139**
	修正 Simpson 均匀性指数 Modified Simpson's evenness index	−0.409**	−0.166**	−0.183**

度统计关系不显著；市域范围内，总边缘对比度（total edge contrast index，TECI）、斑块凝聚度（COHESION）、邻近度指标均值（mean proximity index，PROX_MN）、核心斑块总面积（total core area，TCA）

等指数与LST显著相关且具有一定的解释能力。

为找出不同环境基质条件下对地表温度影响最大的景观指数，对所有景观格局指数进行主成分回归分析，得到武汉市主城区、都市发展区和市域景观指数与地表温度的主成分回归方程（表5）。主城区范围，对地表温度贡献最大的是水体斑块所占景观面积比例（PLAND_W）和建设用地斑块所占景观面积比例（PLAND_C），两者的标准化回归系数绝对值大小接近，说明水体面积和建设用地面积对格网内地表温度变化的贡献几乎同等重要；此外，绿地边缘对比度均值（ECON_MN_G）和水体斑块密度（PD_W）也是影响地表温度的主要景观指数，这4个指数共同解释了主城区84.9%的地表温度变化。都市发展区范围，格网内地表温度变化的主导因子依然是建设用地斑块类型面积（CA_C）和水体斑块所占景观面积比例（PLAND_W），两者的贡献度接近；景观（水平）核心斑块面积比均值（mean core area index，CAI_MN_L）和绿地斑块所占景观面积比例（PLAND_G）也是重要的影响因子，但贡献较小，4个因子共同解释了都市发展区78.1%的地表温度变化。市域范围，依次为水体边缘密度（ED_W）、建设用地斑块所占景观面积比例（PLAND_C）、景观（水平）核心斑块面积比均值（CAI_MN_L）和农用地斑块所占景观面积比例（PLAND_F），能解释69.9%的地表温度变化。总体看，水体和建设用地规模是热场空间变化的主导因素，在其他因素不变的情况下，建设用地面积每增加10%，主城区、都市发展区和市域的地表温度分别增加1.0、0.8和1.0 ℃；而当其他因素不变时，水体面积每增加10%，主城区和都市发展区地表温度分别下降1.1和0.9 ℃。

表5 景观格局指数与地表温度的主成分回归方程

Table 5 Principal component regression equations between landscape pattern index and LST

尺度 Scale	类型 Type	回归方程 Regression model	R^2
主城区	标化线性回归方程	$Y'=-0.884X_1+0.827X_2+0.147X_3-0.169X_4$	0.849
	一般线性回归方程	$Y=-0.109X_1+0.097X_2+0.043X_3-0.281X_4+29.450$	
都市发展区	标化线性回归方程	$Y'=-0.735X_1+0.776X_5-0.071X_6-0.062X_7$	0.781
	一般线性回归方程	$Y=-0.093X_1+0.084X_5-0.023X_6-0.010X_7+34.966$	
市域	标化线性回归方程	$Y'=0.590X_2+0.173X_8-0.595X_9+0.243X_6$	0.699
	一般线性回归方程	$Y=0.098X_2+0.023X_8-0.053X_9+0.079X_6+23.697$	

注：Y表示LST，X_1表示PLAND_W，X_2表示PLAND_C，X_3表示ECON_MN_G，X_4表示PD_W，X_5表示CA_C，X_6表示CAI_MN_L，X_7表示PLAND_G，X_8表示PLAND_F，X_9表示ED_W。Note: Y indicates LST, X_1 indicates PLAND_W, X_2 indicates PLAND_C, X_3 indicates ECON_MN_G, X_4 indicates PD_W, X_5 indicates CA_C, X_6 indicates CAI_MN_L, X_7 indicates PLAND_G, X_8 indicates PLAND_F, X_9 indicates ED_W.

3 讨 论

水体和绿地能够有效发挥热环境调节功能，呈现明显的冷岛效应[1,7]，但前人大多只关注城市绿地或水体单要素的降温作用[9-11,20,25]，较少考虑两者作用于地表温度时的交互作用，缺少对蓝绿空间综合体降温效应的探讨[21-23]，本研究中，蓝色空间的降温强度（8.96～9.34 ℃）明显高于绿色空间（4.44～5.47 ℃），这与相关研究结论[12]一致。传统研究多是基于若干景观指数与LST构建定量关系，通过判断指数与LST关系的显著性确定蓝绿基础设施降温作用的主要影响因素[24,35]，故而主要影响因素只能来源于事先选定的若干景观指数，不同研究选用的景观指数各不相同，研究结果因此差异较大甚至相互矛盾[6,25]。本研究选取70个常用的景观指数表征蓝绿空间的格局特征，探讨蓝绿基础设施的降温效应，结果发现，当单独分析水体和绿地的降温作用时，绝大部分景观指数在0.01的置信度水平上与地表温度显著相关（表2）；但考虑所有景观指数对地表温度的综合影响时，真正对地表温度变化起重要作用且相互独立的指数只有少数几个（表3和表5）。说明若不考虑其他变量的交互作用、主观选择部分景观指数并分析其与LST的相关性[37]，结果势必具有偶然性[2,39]，这就能解释前人研究结论的差异性。

主城区、都市发展区和市域范围，蓝绿空间对地表温度变化的主要影响因子和解释能力明显不同，表现出明显的环境基质效应（表3）。主城区因人为活动频繁、建设用地为主导地表景观类型，呈现典型

的人工基质特征[25]，水体的降温贡献明显大于绿地，提高水体规模及面积占比有助于提高通风效率、加速热交换[20]，是蓝绿空间降温的主要途径。因此，加大城市大型水体的保护力度形成局地小气候，或通过连通城市小型水体和绿地空间突出生态基质特征，有助于发挥城市蓝绿基础设施的降温效应[25,35]。都市发展区和市域范围，水体和绿地面积依然是影响热环境的主要因素，但其相对贡献度明显减小；表征蓝绿空间组合方式的指数如 CWED_W、SIMI_MN_G 、LSI_W 等开始发挥更大作用。说明蓝绿基础设施在粗尺度、复杂基质环境下，需要更多考虑蓝绿空间布局及与其他景观类型的空间关系[22,24,39]，在保证水体和大型绿地规模的基础上，通过丰富水体和绿地的形状、加强蓝绿空间与周边环境的连通、加速蓝绿基础设施与其他系统的热交换等途径，提升蓝绿基础设施的降温效果[23]。当综合考虑蓝绿空间要素之外其他因素的叠加影响时，绿地对地表温度的影响被显著弱化或平抑（表 5），水体和建设用地对地表温度变化的解释能力相对较强，对热环境的综合作用表现出近乎同等的贡献，建设用地斑块所占景观面积比例（PLAND_C）是地表温度升高的最大贡献者[37]。这表明，不同环境基质条件下，蓝绿空间降温效应的主导因子及其作用机制存在系统性差异，景观格局—热环境过程的关系会随基质背景变化而发生相应变化，凸显了城市热环境调控中实施分区、分尺度蓝绿空间配置策略的必要性。

本研究中，无论哪种基质、哪种研究情景，水体斑块所占景观面积比例（PLAND_W）均是降低地表温度的最大贡献者，这与武汉前期相关研究结论[2,37]一致；但其他城市最能缓解热岛效应的为林地或耕地[40]，这可能与不同气候区研究地的景观组成存在差异有关[2,41]。武汉市水体众多、水资源丰富、水域面积占比较大，本研究以武汉市为研究载体，充实了蓝绿基础设施降温研究的样本，但可能一定程度上强化了水体的降温效应；未来可通过不同气候区城市的对比研究，检验研究结论的适用性。本研究比较了水体和绿地的冷岛效应及蓝绿空间综合体的降温特征，分析了不同基质条件下蓝绿空间格局特征对热环境的影响，发现蓝绿基础设施的热环境调节作用具有明显的基质效应。但蓝绿空间降温效应的协同机制如何、蓝绿空间如何配置、优化布局才能强化其协同作用？本研究尚未解决这些问题，未来可设计不同情景下蓝绿空间的协同降温效果研究，探讨最佳配置方案。本研究基于主城区、都市发展区和市域 3 种常见环境基质，分析了蓝绿空间的冷岛效应及其降温效应的主要影响因素，发现蓝绿基础设施的热环境调节作用具有明显的基质环境效应，但未能基于热场空间特征对基质环境进行细分，不同基质特征究竟如何影响蓝绿空间的降温机制仍缺乏细致深入的探讨，这些不足均需要在未来的研究中得到重视。本研究结果主要基于 2022 年遥感影像，重点探讨蓝绿空间格局对热环境的影响，未来可在此基础上引入多时相遥感数据，探讨不同年份、不同季节条件下蓝绿空间降温效应的变化特征。同时，可结合实地微气候监测数据遥感反演地表温度结果进行验证，以提高遥感反演的精度，引入空间自相关等分析方法增强统计的可靠性。

参考文献 References

[1] GUNAWARDENA K R, WELLS M J, KERSHAW T. Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity [J]. The science of the total environment, 2017, 584/585: 1040-1055.

[2] 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).

[3] LEHNERT M, BRABEC M, JUREK M, et al. The role of blue and green infrastructure in thermal sensation in public urban areas: a case study of summer days in four Czech cities [J/OL]. Sustainable cities and society, 2021, 66: 102683 [2025-10-14]. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102683.

[4] WARD K, LAUF S, KLEINSCHMIT B, et al. Heat waves and urban heat islands in Europe: a review of relevant drivers [J]. The science of the total environment, 2016, 569/570: 527-539.

[5] TALEGHANI M. Outdoor thermal comfort by different heat mitigation strategies: a review [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2018, 81: 2011-2018.

[6] DEILAMI K, KAMRUZZAMAN M, LIU Y. Urban heat island effect: a systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures [J]. International journal of applied earth observation and geoinformation, 2018, 67: 30-42.

[7] ISLAM M R, SHAHFAHAD, TALUKDAR S, et al. Evaluating cooling effect of blue-green infrastructure on urban thermal environment in a metropolitan city: using geospatial and machine learning techniques[J/OL]. Sustainable cities and society, 2024, 113: 105666 [2025-10-14]. https://doi. org/10.1016/j.scs.2024.105666.

[8] HWANG Y H, LUM Q J G, CHAN Y K D. Micro-scale thermal performance of tropical urban parks in Singapore[J]. Building and environment, 2015, 94: 467-476.

[9] AFLAKI A, MIRNEZHAD M, GHAFFARIANHOSEINI A, et al. Urban heat island mitigation strategies: a state-of-the-art review on Kuala Lumpur, Singapore and Hong Kong[J]. Cities, 2017, 62: 131-145.

[10] BARTESAGHI KOC C, OSMOND P, PETERS A. Evaluating the cooling effects of green infrastructure: a systematic review of methods, indicators and data sources[J]. Solar energy, 2018, 166: 486-508.

[11] SHAH A, GARG A, MISHRA V. Quantifying the local cooling effects of urban green spaces: evidence from Bengaluru, India[J/OL]. Landscape and urban planning, 2021, 209: 104043[2025-10-14]. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104043.

[12] 杨朝斌, 张亭, 胡长涛, 等. 蓝绿空间冷岛效应时空变化及其影响因素: 以苏州市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(3): 677-688. YANG C B, ZHANG T, HU C T, et al. Spatial-temporal characteristics of the cooling island for blue-green space and its driving factors in Suzhou, China[J]. Resources and environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(3): 677-688 (in Chinese with English abstract).

[13] CHEUNG P K, JIM C Y. Differential cooling effects of landscape parameters in humid-subtropical urban parks[J/OL]. Landscape and urban planning, 2019, 192: 103651[2025-10-14]. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.103651.

[14] SUN F H, ZHANG J H, TAKEDA S, et al. Assessing the mitigating effects of clustered small green spaces on urban canyon heatwaves: a case study of the Tsukiji-Gawa, Tokyo[J/OL]. Building and environment, 2025, 283: 113373[2025-10-14]. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113373.

[15] XIANG Y, YUAN C, CEN Q Y, et al. Heat risk assessment and response to green infrastructure based on local climate zones[J/OL]. Building and environment, 2024, 248: 111040[2025-10-14]. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111040.

[16] ARZBERGER S, EGERER M, SUDA M, et al. Thermal regulation potential of urban green spaces in a changing climate: winter insights [J/OL]. Urban forestry & urban greening, 2024, 100: 128488[2025-10-14]. https://doi. org/10.1016/j.ufug.2024.128488.

[17] SUN X, TAN X Y, CHEN K L, et al. Quantifying landscape-metrics impacts on urban green-spaces and water-bodies cooling effect: the study of Nanjing, China[J/OL]. Urban forestry & urban greening, 2020, 55: 126838[2025-10-14]. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126838.

[18] CHEN X, WANG H, YANG J C. Effect of green blue spaces on the urban thermal environment: a field study in Hong Kong [J/OL]. Urban climate, 2024, 55: 101912 [2025-10-14]. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101912.

[19] TOMINAGA Y, SATO Y, SADOHARA S. CFD simulations of the effect of evaporative cooling from water bodies in a micro-scale urban environment: validation and application studies[J]. Sustainable cities and society, 2015, 19: 259-270.

[20] XIE Q J, REN L, YANG C Z. Regulation of water bodies to urban thermal environment: evidence from Wuhan, China[J/OL]. Frontiers in ecology and evolution, 2023, 11: 983567 [2025-10-14]. https://doi.org/10.3389/fevo.2023.983567.

[21] 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[J]. 应用生态学报, 2015, 26(2): 636-642. YU Z W, GUO Q H, SUN R H. Impacts of urban cooling effect based on landscape scale: a review[J]. Chinese journal of applied ecology, 2015, 26(2): 636-642 (in Chinese with English abstract).

[22] ZHOU W, CAO W, WU T, et al. The win-win interaction between integrated blue and green space on urban cooling[J/OL]. The science of the total environment, 2023, 863: 160712[2025-10-14]. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160712.

[23] 李建春, Chen Y Wendy, 袁文华. 城市蓝绿空间降温绩效评估及提升策略: 以北京市为例[J]. 地理科学, 2024, 44(8): 1376-1386. LI J C, CHEN Y W, YUAN W H. Evaluation and improvement strategies for cooling performance in urban blue-green spaces[J]. Scientia geographica sinica, 2024, 44(8): 1376-1386 (in Chinese with English abstract).

[24] 沈中健, 王金岩, 李少星. 济南市不同地理单元下蓝绿景观格局对地表温度的影响及分异规律[J]. 地理科学, 2025, 45(5): 1143-1156. SHEN Z J, WANG J Y, LI S X. Effects of blue-green landscape patterns on land surface temperature in different geographic units of Jinan City[J]. Scientia geographica sinica, 2025, 45(5): 1143-1156 (in Chinese with English abstract).

[25] 谢启姣, 杨晨哲, 任陆. 武汉城市水体热环境调节机制的尺度效应[J]. 生态学杂志, 2024, 43(8): 2325-2333. XIE Q J, YANG C Z, REN L. Scale effect of regulating mechanism of urban water bodies in improving thermal environment in Wuhan, China[J]. Chinese journal of ecology, 2024, 43(8): 2325-2333 (in Chinese with English abstract).

[26] HE M W, YUAN C, ZHANG X, et al. Impacts of green-blue-grey infrastructures on high-density urban thermal environment at multiple spatial scales: a case study in Wuhan[J/OL]. Urban climate, 2023, 52: 101714 [2025-10-14]. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101714.

[27] 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).

[28] 杨微,齐锋.景观格局与村域地温的相关性规律研究:以平湖为例[J].现代园艺,2023,46(21):16-19. YANG W, QI F. Study on the correlation between landscape pattern and village ground temperature: a case study of Pinghu[J].Contemporary horticulture,2023,46(21):16-19 (in Chinese).

[29] 刘诗喆,谢苗苗,武蓉蓉,等.地理单元划分对城市热环境响应规律的影响:以北京为例[J].地理科学进展,2021,40(6):1037-1047. LIU S Z, XIE M M, WU R R, et al. Influence of the choice of geographic unit on the response of urban thermal environment: taking Beijing as an example[J]. Progress in geography, 2021, 40(6): 1037-1047 (in Chinese with English abstract).

[30] 徐涵秋.新型Landsat8卫星影像的反射率和地表温度反演[J].地球物理学报,2015,58(3):741-747. XU H Q.Retrieval of the reflectance and land surface temperature of the newly-launched Landsat 8 satellite[J].Chinese journal of geophysics, 2015,58(3):741-747 (in Chinese with English abstract).

[31] 覃志豪, Zhang Minghua, Arnon Karnieli, 等. 用陆地卫星TM6数据演算地表温度的单窗算法[J].地理学报,2001,56(4):456-466. QIN Z H, ZHANG M H, KARNIELI A, et al. Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from landsat TM6 data[J].Acta geographica sinica, 2001, 56(4):456-466 (in Chinese with English abstract).

[32] 何好,张运,汤志,等.Landsat8热红外波段地表比辐射率估算方法改进[J].安徽师范大学学报(自然科学版),2020,43(5):475-482. HE H, ZHANG Y, TANG Z, et al. An improved method for estimating land surface emissivity in Landsat8 thermal infrared bands[J].Journal of Anhui normal university (natural science), 2020, 43(5): 475-482 (in Chinese with English abstract).

[33] 谢启姣,刘进华,胡道华.武汉城市扩张对热场时空演变的影响[J].地理研究,2016,35(7):1259-1272. XIE Q J, LIU J H, HU D H. Urban expansion and its impact on spatio-temporal variation of urban thermal characteristics: a case study of Wuhan[J]. Geographical research, 2016, 35(7): 1259-1272 (in Chinese with English abstract).

[34] OKE T R. Boundary layer climates[M].2nd ed. London: Routledge, 1990.

[35] WU J S, LI C M, ZHANG X, et al. Seasonal variations and main influencing factors of the water cooling islands effect in Shenzhen[J/OL]. Ecological indicators, 2020, 117: 106699[2025-10-14]. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106699.

[36] AMARIPADATH D, SAILOR D J. Systematic review on cooling benefits of landscape strategies for urban thermal environments in the United States[J/OL]. Sustainable cities and society, 2025, 129: 106497 [2025-10-14]. https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106497.

[37] 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).

[38] CHEN A L, YAO L, SUN R H, et al. How many metrics are required to identify the effects of the landscape pattern on land surface temperature? [J]. Ecological indicators, 2014, 45: 424-433.

[39] 刘焱序,彭建,王仰麟.城市热岛效应与景观格局的关联:从城市规模、景观组分到空间构型[J].生态学报,2017,37(23):7769-7780. LIU Y X, PENG J, WANG Y L. Relationship between urban heat island and landscape patterns: from city size and landscape composition to spatial configuration[J]. Acta ecologica sinica, 2017, 37(23): 7769-7780 (in Chinese with English abstract).

[40] 裔传祥,胡继超,李小军.土地覆盖类型对城市热岛效应的响应分析[J].测绘通报,2018(1):72-76. YI C X, HU J C, LI X J. Response analysis of land cover types on urban heat island effect[J]. Bulletin of surveying and mapping, 2018(1): 72-76(in Chinese with English abstract).

[41] 曹璐,胡瀚文,孟宪磊,等.城市地表温度与关键景观要素的关系[J].生态学杂志,2011,30(10):2329-2334. CAO L, HU H W, MENG X L, et al. Relationships between land surface temperature and key landscape elements in urban area[J]. Chinese journal of ecology, 2011, 30(10): 2329-2334 (in Chinese with English abstract).

Effects of patterns of blue-green spatial landscape on land surface temperature under different environmental contexts in Wuhan City

XIE Qijiao, XIAO Shengyong

School of Tourism, Hubei University, Wuhan 430062, China

Abstract The quantitative relationship between all commonly used landscape metrics and land surface temperature (LST) across three spatial contexts including the main urban area, the urban development area, and the entire municipality of Wuhan City was analyzed by deriving the LST values and classifying land cover categories of Wuhan city based on Landsat 8-9 remote sensing data acquired on September 18 and 19, 2022 to study the effects of the patterns of blue-green spatial landscape on the LST to better utilize the thermal environment regulation function of blue-green infrastructure. The principal component regression analysis was used to identify the dominant factors affecting LST under different spatial contexts and reveal their underlying mechanisms. The results showed that water bodies and green spaces had a significant "cooling island effect", with the cooling intensity of water bodies (8.96-9.34 ℃) significantly greater than that of green spaces (4.44-5.47 ℃). Overall, the independent explanatory power of the landscape metrics for LST changes followed in the order of water bodies > green spaces, landscape composition > spatial configuration, patch-level > landscape-level > class-level, and the main urban area > the urban development area > the administrative area. The dominant factors affecting LST varied across spatial contexts. The four key factors in the main urban area were the percentage of water body area (PLAND_W), water body patch density (PD_W), effective mesh size of green spaces (MESH_G), and edge density of green spaces (ED_G), collectively explaining 82.4% of the LST variation. The dominant factors in the metropolitan development area were contrast-weighted edge density of water bodies (CWED_W), percentage of water body area (PLAND_W), mean proximity index of green spaces (SIMI_MN_G), and percentage of green space area (PLAND_G), collectively explaining 59.2% of the LST variation. The five dominant landscape metrics related to blue-green spaces in the entire municipality, only explained 35% of the LST variation. Water bodies and construction land had a strong explanatory power for changes in the thermal environment, and the cooling effect of green spaces was significantly weakened or suppressed when considering the combined effects of other landscape elements outside of blue-green spaces. It is indicated that the regulation function of blue-green infrastructure in the thermal environment has a distinct context effect. Measures for optimizing the spatial allocation and structural configuration of blue-green landscapes according to different environmental matrices including preserving large water bodies in central urban areas, ensuring adequate water surface coverage, enhancing connectivity between smaller water bodies, enriching the morphological complexity of blue-green spaces in urban development zones and metropolitan regions, and strengthening their interactive frequency with surrounding environments can effectively enhance the cooling performance of blue-green infrastructure.

Keywords blue-green infrastructure; heat island effect; cooling island effect; pattern of landscape; context effect

(责任编辑:张志钰)