北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

功能区视角下城市形态对热环境的季节性影响

张艺萌 王贺封 刘佳 任雨达

Seasonal impact of urban morphology on thermal environment from theperspective of functional zones

Zhang Yimeng, Wang Hefeng, Liu Jia, Ren Yuda

引用本文:
张艺萌, 王贺封, 刘佳, 任雨达. 功能区视角下城市形态对热环境的季节性影响[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(3):113–127. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250400
Zhang Yimeng, Wang Hefeng, Liu Jia, Ren Yuda. Seasonal impact of urban morphology on thermal environment from theperspective of functional zones[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(3):113–127. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250400

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250400

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

北京园林树木秋色盛期的空间异质性及其对热环境差异的响应
Spatial heterogeneity in leaf coloring date and the phenological response to thermal environment variations of Beijing landscape trees
北京林业大学学报, 2024, 46(1): 119–130. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210546

基于复杂网络理论的黔中城市群冷岛网络优化与热环境缓解
Optimization of cold island network and thermal environment mitigation in urban agglomeration based on complex network theory in central Guizhou Province, southwestern China
北京林业大学学报, 2026, 48(1): 166–179. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250278

城市居住区绿地小微尺度下垫面构成对环境微气候的影响
Effects of micro scale underlying surface type and pattern of urban residential area on microclimate: taking Beijing as a case study
北京林业大学学报, 2021, 43(10): 100–109. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200256

都市圈冷热岛空间网络构建与优化
Construction and optimization of cold and heat island networks for metropolitan area: an integration of interpretable machine learning and circuit theory
北京林业大学学报, 2025, 47(7): 152–166. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250150

不同地理空间城市森林空气负离子浓度及其影响因素研究
Negative air ion concentration and its influencing factors of urban forest in different geographical spaces
北京林业大学学报, 2023, 45(11): 66–77. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220246

融合长时序遥感和地面实测的北京城市森林碳汇功能多尺度评估及其影响因素
Multi–scale assessment of carbon sequestration function of urban forests in Beijing and its influencing factors by integrating long–time–series remote sensing and field survey
北京林业大学学报, 2025, 47(12): 26–38. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250120

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250400

功能区视角下城市形态对热环境的季节性影响

张艺萌[1] 王贺封[1,2] 刘 佳[1] 任雨达[1]
（1. 河北工程大学矿业与测绘工程学院，河北 邯郸 056038；2. 邯郸市自然资源空间信息重点实验室，河北 邯郸 056038）

摘要:【目的】快速城市化进程加剧了城市热环境恶化，深入探究城市形态对热环境的影响机制已成为指导城市规划与缓解热胁迫的关键。**【方法】**本研究聚焦典型高密度区域—上海中心城区，综合运用路网、土地利用、建筑、遥感影像、POI等多源数据，基于功能区视角，在街区尺度量化城市形态与地表温度（LST）特征，采用随机森林回归（RFR）和部分依赖分析（PDP）方法，系统揭示不同功能区城市形态对 LST 的相对贡献与非线性影响。**【结果】**城市形态对地表温度的影响呈现出明显的季节分异和空间异质性特征。春、夏季节，二维景观指标对地表温度的调控作用突出，尤其在绿地广场和交通设施区域的降温响应敏感；秋、冬季节，三维建筑形态成为主要影响因子，该影响在商业区、工业区和居民区尤为显著。不同季节与功能区所对应的升降温机制亦存在差异。春、夏季节，绿地广场主要通过水体比例和天空可视因子实现降温，而交通设施区域则多依赖斑块密度和绿地占比；秋、冬季节，平均建筑高度和建筑高度标准差成为最主要的降温因子。**【结论】**本研究在功能区分类的基础上，结合 RFR 与 PDP 方法，揭示了异质性区域热环境关键影响因子及其对 LST 的非线性影响模式，深化了对城市热环境季节动态规律的理解，为差异化城市形态调控策略实施提供了科学依据。

关键词：热环境；城市功能区；城市形态；地表温度；随机森林回归
中图分类号：F205；TP79；TU984 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)03−0113−15
引文格式：张艺萌，王贺封，刘佳，等. 功能区视角下城市形态对热环境的季节性影响［J］. 北京林业大学学报，2026，48(3)：113−127. Zhang Yimeng, Wang Hefeng, Liu Jia, et al. Seasonal impact of urban morphology on thermal environment from theperspective of functional zones［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(3): 113−127.

Seasonal impact of urban morphology on thermal environment from the perspective of functional zones

Zhang Yimeng[1] Wang Hefeng[1,2] Liu Jia[1] Ren Yuda[1]
(1. School of Mining and Geomatics Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China;
2. Key Laboratory of Natural Resources Spatial Information, Handan 056038, Hebei, China)

Abstract:［**Objective**］Rapid urbanization has significantly exacerbated the deterioration of urban thermal environment. A deep understanding of the influence mechanism of urban morphology is thus crucial for guiding urban planning and mitigating urban heat stress.［**Method**］This study focuses on a typical high-density region, the central urban area of Shanghai. Multi-source data, including road networks, land use, building data, remote sensing imagery, and POIs were integrated to quantify urban morphology and land surface temperature (LST) at the block scale from the perspective of functional zones. Using random forest regression (RFR) and partial dependence plot (PDP) analysis, the study systematically elucidated the relative contributions and nonlinear influences of urban morphological factors on LST across various functional zones.［**Result**］The findings demonstrated significant seasonal differentiation and spatial heterogeneity.The

收稿日期: 2025−10−16 **修回日期:** 2025−12−18
基金项目: 国家自然科学基金项目（42071246），河北省高等学校科学技术研究项目（QN2024160）。
第一作者: 张艺萌。主要研究方向：城市热环境。Email：18292946824@163.com 地址：056038 河北省邯郸经济技术开发区太极路 19 号河北工程大学矿业与测绘工程学院。
责任作者: 王贺封，教授。主要研究方向：遥感生态监测。Email：wanghefeng@hebeu.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

regulatory role of two-dimensional landscape indicators was prominent in spring and summer, with notable cooling effects in green spaces, squares, and transportation zones. In autumn and winter, three-dimensional building morphology became the dominant factor, particularly within commercial, industrial, and residential areas.The mechanisms underlying temperature increases and decreases also varied across different seasons and functional zones. During spring and summer, cooling in green spaces and squares was primarily achieved through percentage of water (PW) and sky view factor (SVF),where as transportation zones relied more on patch density (PD) and percentage of green (PG). In autumn and winter, average building height (AH) and architecture height standard deviation (AHSD) emerged as the dominant cooling factors. [**Conclusion**] By integrating functional zones with RFR and PDP analysis, this study identifies key thermal environment drivers in heterogeneous regions and elucidates their nonlinear relationships with LST. These findings advance our understanding of the seasonal dynamics of urban thermal environments and provide a scientific basis for formulating differentiated urban morphology regulation strategies.

Key words: thermal environment; urban functional zones; urban morphology; surface temperature; random forest regression

在全球气候变化与快速城市化的双重作用下，城市地表覆被发生显著变化，自然植被持续减少，人工不透水表面快速扩张。这一转变直接导致城市地表热辐射增强，加剧了热岛效应等城市小气候问题。由此引发的负面影响主要表现为城市能源消耗增加[1]、大气污染加剧[2]以及室外热舒适度降低[3]。城市热环境的恶化已成为当前构建韧性城市所面临的生态环境方面的重大挑战[4]。根据 IPCC 报告，2011—2020 年，全球表面温度较 1850—1900 年已上升约 1.1 ℃，世界主要城市的升温速度更是高达全球平均水平的约 2 倍[5]。在此背景下，探究城市热环境的时空特征及其驱动因素对于科学应对气候变化、改善人居环境舒适度及推动城市可持续发展具有至关重要的意义。

地表温度（LST）受土地覆被、建筑形态、人类活动和气象条件等多因素的综合影响，各要素相互作用，共同决定城市热环境的时空分布特征[6–8]。作为城市规划建设的基本要素和空间表征载体，城市形态对地表温度的影响机制备受学界关注。其通过影响城市热辐射和通风效率，进而改变热量聚集和蒸散发过程，是塑造热环境的关键驱动因素，并在维持城市生态平衡和缓解热岛效应中发挥重要作用[9–10]。现有研究多从景观指标、建筑形态、地表参数等方面量化城市形态，探究其对 LST 的影响[11]，但仍侧重于单一建筑或绿地要素对热环境调控作用的统计性描述[12–13]，缺乏对二维（2D）、三维（3D）城市形态协同影响机制的深入解析；与此同时，对于空间异质性与非线性特征解释不足。城市形态往往具有显著的空间差异，而现有研究普遍基于区域均质化假设，未能充分考虑不同建筑配置条件下城市形态降温效应的关键阈值与非线性响应特征。因此，在高度异质性城市区域，如何综合多维城市形态指标，充分挖掘其降温潜力，提出具体、有针对性的热缓解策略，成为亟待深入研究的课题。城市功能区（UFZ）作为反映多样化人类活动的重要空间单元，其类型差异往往导致人为热释放的不均匀分布，为区域差异化热环境影响机制探究提供了条件[14]。作为反映城市自然特征和社会经济活动区域异质性的典型代表，UFZ 能够反映城市内部细微的空间结构差异[15]。现有研究表明，不同功能区对 LST 空间分布的贡献度存在显著差异[16–17]。此外，受水热条件、植被覆盖与太阳辐射等环境因子季节变化的影响，城市形态对 LST 的影响呈现出明显的季节性特征[18]，例如，Yao 等[19]研究发现，福州地区天空可视因子在所有季节均产生增温效应，而 Li 等[20]学者则发现，在武汉市，天空可视因子仅在夏季表现出增温作用。这种季节性差异制约了相关研究成果向城市规划与管理实践的转化。因此，如何系统解析城市形态对热环境影响的空间分异规律及其随季节变化的动态响应机制已成为当前研究的热点。

基于上述研究背景，针对城市形态影响热环境的空间异质性与季节性动态机制尚不明确的问题，本研究聚焦上海市中心城区，运用 RFR 模型，系统解析不同 UFZ 类型中城市形态对 LST 的影响机制。具体研究目标为：（1）揭示不同 UFZ 类型 LST 的季节分异特征；（2）量化不同 UFZ 类型中城市形态因子对四季 LST 变化的贡献度；（3）解析不同季节、不同 UFZ 内主要影响因子对 LST 的边际效应。本研究聚焦功能区视角下的城市形态优化路径，旨在为缓解局地热岛效应、改善城市热环境质量、提升城市气候韧性水平提供系统性的科学依据与坚实的理论支撑。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

上海作为中国东部沿海的直辖市之一，在快速城市化与工业化的驱动下，已发展成为全球人口密度最高的城市之一，截至 2023 年底，常住人口达 2 487 万。该市属亚热带湿润气候，具有夏热冬暖的气候特征。自 2000 年以来，持续的人口集聚与建成区扩张深刻重塑了其空间结构，导致人造地表持续蔓延。这一进程加剧了城市热环境问题[21]，使上海面临热浪频发与热岛效应加剧的双重热胁迫。其中，中心城区因其高度密集的人类活动和多元化的建筑结构，热场分布尤为复杂，是探究城市形态与热环境相互作用的理想区域。因此，本研究基于《上海市城市总体规划（2017—2035）》，聚焦外环线以内的中心城区（图 1），重点探讨不同城市功能区内二维与三维城市形态对 LST 影响的季节分异规律。

1.2　数据获取与处理

Landsat 8-9 Collection 2 Level-2 数据来源于 USGS（https://www.usgs.gov/），研究区域影像均无云层遮挡，具体采用的影像信息见表 1。为避免极端天气对研究结果的潜在干扰，选取 3 年中同一季节的影像进行 LST 计算，要求所选各季节影像的 LST 波动较小，变异系数（CV）小于 10%，基于此，采用 3 年多时相影像的平均值分别表征季节地表温度特征。

道路网络数据源自 Open Street Map（OSM），用于基本研究单元的划分；土地利用数据来自武汉大学 CLCD 数据集（https://zenodo.org/records/12779975），用于计算景观指标；POI 数据来源于高德地图 API（https://lbs.amap.com/），包含 40 余万条记录，涵盖位置及属性等信息，与道路网络数据结合用于城市功能区划分；建筑数据来源于 Zenodo 数据库（https://zenodo.org/records/11397015），包含建筑高度等信息，用于计算建筑形态指标。

1.3　研究方法

1.3.1　城市形态指标选取与计算方法

为从二维景观格局与三维建筑形态 2 方面系统表征与地表温度高度相关的城市形态指标，研究依据可操作性、数据可获得性及广泛应用性原则选取核心指标[22]。在二维景观层面，主要选取了斑块密度（PD）、最大斑块指数（LPI）、景观形状指数（LSI）、聚集度指数（AI）、绿地比例（PG）和水体比例（PW）6 个常用景观格局指标，以量化其结构特征与空间配置。上述指标均通过 Fragstats 4.2 软件计算得出，具体计算公式和描述见表 2。

由于建筑物的形状和结构会对地表温度的空间分布产生显著影响[23]，因此在三维建筑形态方面，侧重于反映建筑物结构及空间组合形式，选取建筑密度（BD）、容积率（FAR）、平均建筑高度（AH）、建筑体积密度（BVD）、建筑高度标准差（AHSD）、天空可视因子（SVF）6 个建筑形态指标，该类指标均通过 Arc GIS 10.8 软件计算得到，相应的计算公式及描述如表 3 所示。

1.3.2　城市地表温度计算与分级

Landsat 8-9 Collection 2 Level 2 数据包含了地表反射率（SR）和地表温度（ST）产品。利用第 10 波段（ST_10）进行 LST 计算，该波段数据已通过官方标准处理流程进行了预处理，在应用指定的缩放因子和转换公式后，可直接计算得到 LST。

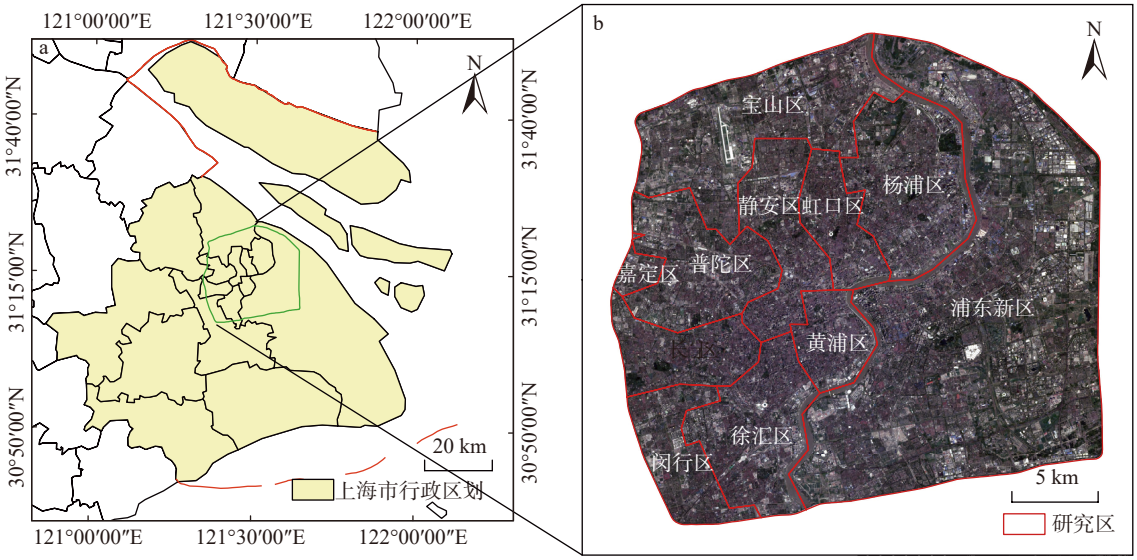


图 1　研究区概况

Fig. 1　Overview of the study area

表 1 Landsat8/9 影像信息

Tab. 1 Landsat8/9 image information

季节	卫星	日期	云量
春季	Landsat9	2022−03−23	0.30
	Landsat9	2023−03−26	0.09
	Landsat8	2024−03−20	0.72
夏季	Landsat9	2022−08−14	2.90
	Landsat8	2022−08−22	3.30
	Landsat8	2024−08−11	21.72
秋季	Landsat9	2023−11−21	0.20
	Landsat8	2023−11−29	21.90
冬季	Landsat9	2022−01−02	2.50
	Landsat8	2023−01−29	0.28
	Landsat9	2024−02−09	0.20

$$\mathrm{LST} = \mathrm{DN} \times 0.003\,418\,02 + 149 - 273.15 \quad (1)$$

式中：DN 为像元灰度值；0.003 418 02 为比例因子，用于将 DN 值转换为亮度温度；149 为亮度温度的基准值偏移量，确保热红外波段的辐射温度与传感器校准数据一致；273.15 用于将计算出的开尔文温度转化为摄氏度。

基于计算得到的 LST，采用均值−标准差法[24]，即通过城市地表温度平均值与不同倍数标准差组合来划分热场等级，以有效表征城市热环境的空间分布特征，具体等级划分如表 4 所示。

1.3.3 城市功能区识别方法

现有研究表明，POI 数据能够有效表征城市功能特征，并被广泛应用于 UFZ 分类[25−27]。因此，研究采用 POI 数据对 UFZ 进行系统分类。依据《城市用地分类与规划建设用地标准》(GB 50137—2011)[28]，

表 2 二维景观格局指数

Tab. 2 Two-dimensional landscape pattern indexes

指标	计算公式	描述
斑块密度(PD)	$\mathrm{PD} = \frac{N}{A}$	指各景观类型的密度和破碎度，其中：N为景观斑块的数量，A为景观总面积。下同
景观形状指数(LSI)	$\mathrm{LSI} = \frac{\sum_{i=1}^{n} E_i}{2 \times \sqrt{\pi \times \sum_{i=1}^{n} A_i}}$	反映区域内各景观斑块形状特征的特征值，用于描述景观斑块形状复杂程度，其中：E_i为斑块i的边界长度，A_i为斑块i的面积，n为景观斑块总数。下同
聚集指数(AI)	$\mathrm{AI} = \frac{g}{\max(g)} \times 100\%$	用于衡量景观斑块的空间聚集程度，代表各景观类型斑块之间的连通性，其中：g为同类型斑块间的邻接数量
最大斑块指数(LPI)	$\mathrm{LPI} = \frac{\max(A_i)}{A} \times 100\%$	反映区快内最大斑块面积占景观总面积的比例
绿地比例(PG)	$\mathrm{PG} = \frac{A_\mathrm{g}}{A}$	反映街区单元内绿地面积占比，其中：A_g为绿地斑块总面积
水体比例(PW)	$\mathrm{PW} = \frac{A_\mathrm{w}}{A}$	反映街区单元内水体面积占比，其中：A_w为水体斑块总面积

表 3 建筑形态指数

Tab. 3 Building morphology indexes

指标	计算公式	描述
建筑密度(BD)	$\mathrm{BD} = \frac{\sum_{i=1}^{n} S_i}{S_\mathrm{block}}$	反映区块内建筑物的密集程度，其中：S_i为建筑i的占地面积，S_block为街区总面积，n为区块内建筑物数量。下同
容积率(FAR)	$\mathrm{FAR} = \frac{\sum_{i=1}^{n} S_i \times H_i / 3}{S_\mathrm{block}}$	反映区块内单位面积的平均建筑容纳能力，其中：H_i为建筑i的建筑高度。下同
天空可视因子(SVF)	$\mathrm{SVF} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} \sin\gamma_i}{m}$	反映分析单元中建筑物对天空的遮挡，其中：γ_i为地形高低对方位角i处的影响角度；m为方位角的数量
平均建筑高度(AH)	$\mathrm{AH} = \frac{\sum_{b=1}^{n} H_b}{n}$	表示区块内建筑物高度平均值，其中：H_b为建筑b的高度
建筑体积密度(BVD)	$\mathrm{BVD} = \frac{\sum_{i=1}^{n} S_i \times H_i}{S_\mathrm{block} \times H_\mathrm{max}}$	反映区块内城市空间利用率，其中：H_max为区块内最大建筑高度
建筑高度标准差(AHSD)	$\mathrm{AHSD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (H_i - H_\mathrm{mean})^2}{n}}$	反映区块内建筑物高度起伏变化，其中：H_mean为区块内平均建筑高度

表 4　LST 等级划分

Tab. 4　Classification levels of land surface temperature (LST)

温度等级	温区范围	春季	夏季	秋季	冬季
低温区	$T<\mu-1.5\text{std}$	$T<18.0$	$T<43.7$	$T<18.0$	$T<8.7$
次低温区	$\mu-1.5\text{std}\leqslant T<\mu-0.5\text{std}$	$18.0\leqslant T<20.0$	$43.7\leqslant T<47.0$	$18.0\leqslant T<19.8$	$8.7\leqslant T<10.1$
中温区	$\mu-0.5\text{std}\leqslant T<\mu+0.5\text{std}$	$20.0\leqslant T<22.1$	$47.0\leqslant T<50.4$	$19.8\leqslant T<21.5$	$10.1\leqslant T<11.6$
次高温区	$\mu+0.5\text{std}\leqslant T<\mu+1.5\text{std}$	$22.1\leqslant T<24.1$	$50.4\leqslant T<53.8$	$21.5\leqslant T<23.3$	$11.6\leqslant T<13.0$
高温区	$T\geqslant\mu+1.5\text{std}$	$T\geqslant 24.1$	$T\geqslant 53.8$	$T\geqslant 23.3$	$T\geqslant 13.0$

注：μ代表LST均值，std表示标准差。

将原始 POI 数据重新划分为商业区、居民区、工业区、交通设施、绿地广场、公共服务 6 类，基于重分类结果，计算每个街区单元内各类 POI 点的频率密度和比率指数，每个街区单元的功能类别由区块内最大C_i所对应的 POI 类别决定，计算公式如下。

$$F_i=\frac{n_i}{N_i} \tag{2}$$

$$C_i=\frac{F_i}{\sum_{i=1}^{6}F_i}\times 100\% \tag{3}$$

式中：i 表示 POI 类别，n_i是每个街区单元中第 i 类 POI 的数目，N_i是整个研究区内第 i 类 POI 的总数，F_i是以街区单元为单位的第 i 类 POI 的频率密度，C_i是街区单元中第 i 类 POI 的频率密度所占的比率。

为确保城市功能区识别结果准确性，通过随机抽样方法选取 50 个地块单元，与高德地图、谷歌地球高分辨率卫星影像对照，总体精度达到 84%，分类精度较高，各功能区描述如表 5。

1.3.4　随机森林回归模型

随机森林是一种非线性、非参数的集成学习方法，因其较高的预测精度而被广泛应用于城市热环境研究[29−30]。该方法对自变量的多重共线性及交互作用具有较高鲁棒性，同时可借助变量重要性量化影响因子的贡献，并利用部分依赖图揭示各因素对 LST 的边际效应。

为避免各影响因子之间存在高度相关性，导致模型预测结果过拟合，建模前首先采用方差膨胀因子（VIF）进行共线性诊断，仅保留 VIF < 10 的变量作为最终输入因子，变量的筛选结果如表 6。在此基础上，随机选取 80% 数据为训练集，其余 20% 为测试集，网格搜索确定模型最优参数，决定系数 R^2、均方根误差 RMSE 评估模型预测精度。通过量化各指标对地表温度的相对贡献度，识别关键指标，为城市热环境的影响因素探究及缓解策略制定提供重要依据[31−32]。

表 5　城市功能区分类描述

Tab. 5　Classification and description of urban functional zones（UFZs）

类别	描述
商业区	商业服务和金融服务办公场所，包括餐饮、购物、银行等
居民区	居民生活区，包括各种住宅小区、家属楼、社区中心等
工业区	各类公司企业，工厂，产业园区等
公共服务	体育休闲场所、医疗保健服务、政府机构和社会团体、科教文化服务场所，如体育场馆、医院、机关、学校等
交通设施	交通服务，道路配套设施，包括机场、车站、停车场等
绿地广场	城市公园、城市广场

2　结果与分析

2.1　功能区划分结果及季节性地表温度变化分析

功能区空间分布如图 2 所示，整体来看，上海市中心城区的功能区分布较为均衡，各用地类型呈现差异化特征。居民区是最主要的土地利用类型，占研究区总面积的 44.4%，主要分布于黄浦江两岸。其中，黄浦江以东呈明显带状分布，以西则相对均匀；工业区次之，占总面积的 20.5%，主要集中在研究区东部及黄浦江北部沿岸。考虑到上海受东亚季风影响，工业区布局在城市主导风向的下风向区域，有助于减轻工业污染对主城区的影响；公共服务区主要集中于研究区的东南部和西北部，其他区域呈零散分布，占研究区总面积的 14.7%，商业区依托城市核心商圈布局，以前滩、徐家汇及陆家嘴等商业中心为代表，占总面积的 8.1%；绿地广场用地主要沿黄浦江、张家浜等主要水系分布，占比 7.6%；交通设施作

表 6　城市形态指标筛选结果

Tab. 6　Screening results of urban morphology indicators

城市形态指标	PD	LPI	LSI	AI	PG	PW	FAR	SVF	AH	BVD	AHSD
VIF值	1.806	4.859	3.295	3.309	3.257	1.152	3.259	1.531	2.879	1.960	4.642

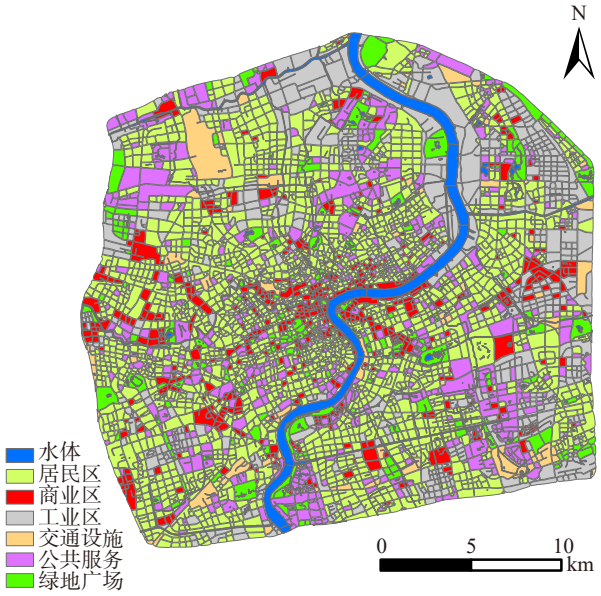


图 2 城市功能区空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution map of UFZs

为面积最小的功能类型，仅占 4.7%，主要包括火车站、汽车站等交通场站。

图 3 反映了各功能区地表温度的季节性变化特征。春季和夏季，工业区表现出最强的局地高温，平均温度分别达到 21.8 和 49.8 ℃，显著高于其他功能区；相比之下，商业区和绿地广场的温度相对较低。秋季和冬季，各功能区温度分布趋于一致，但值得注意的是，绿地广场的温度超过了商业区，这与春夏两季的分布模式形成鲜明对比。商业区出现温度相对较低的原因与其空间分布特征有关，上海主要商圈如陆家嘴等多集中于黄浦江沿岸，近邻大面积水域，水体对周围气温的调节作用明显。总体而言，居民区、工业区及公共服务区地表温度普遍较高，而商业区和绿地广场地表温度相对较低。

2.2 不同季节地表温度空间分布特征

由图 4 可以看出，春秋两季 LST 的空间分布格局总体相似，高温区主要分布于静安区北部、宝山区东部以及浦东新区东北部的工业聚集区，最高温度分别达到 32.26 和 29.09 ℃；夏季次高温区增加明显，主要集中在黄浦江以西的老城区，最高温度达 62.32 ℃；冬季高温区和次高温区的分布范围较其他季节明显收缩，而低温区则有所扩展，其中陆家嘴及其周边区域形成了显著的低温集聚中心。此外，黄浦江水域及沿岸湿地在四季均表现为稳定低温区，与周边建成区形成明显的温度梯度。值得注意的是，在浦东新区南部，密集的河网系统与规模化湿地建设(尤其是张家浜沿线大面积的湿地公园)共同作用，在夏季

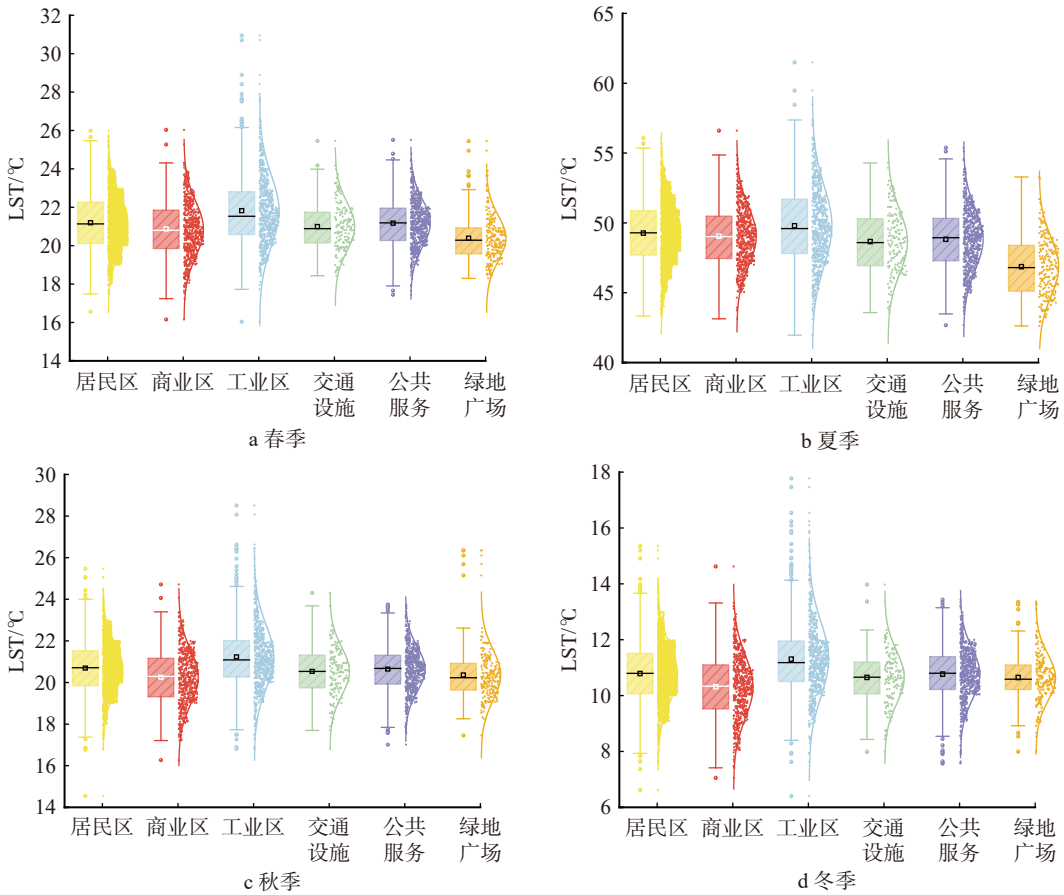


图 3 城市功能区地表温度箱线图

Fig. 3 Boxplot of LST for UFZs

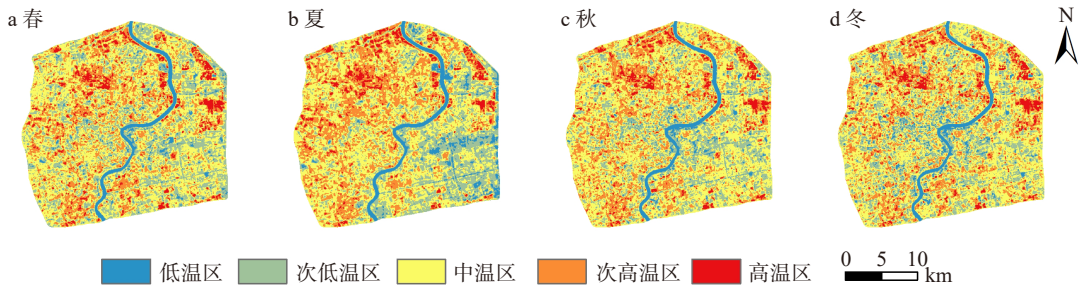


图 4　地表温度分区时空分布图

Fig. 4　Spatial and temporal distribution map of surface temperature zoning

产生显著的降温效果，形成连片分布的低温集聚区。

2.3　城市形态对地表温度影响重要性分析

采用随机森林回归模型计算各指标的相对贡献度（图 5），并对其预测性能进行了统计分析（表 7）。R^2 最大值出现在冬季工业区（$R^2 = 0.601$），最低值出现在夏季公共服务区（$R^2 = 0.475$）；均方根误差介于 0.679 ~ 2.049 之间，整体来看，拟合效果良好。研究发现，城市形态对地表温度的影响很大程度上取决于季节和城市功能区类型，且三维建筑形态对地表温度的影响显著超过二维景观。

在春季，商业区、工业区、公共服务和居民区三维建筑形态对地表温度的贡献明显高于二维景观，其中 AH 在居民区（27.66%）和商业区（26.33%）中解释力最强；而在绿地广场，二维景观格局的总体贡献率超过了建筑形态，达到 55.68%，其中 PW 的贡献最为突出（12.87%）；此外，在交通设施用地，二维景观对地表温度的影响也达到了较高水平，总贡献率达 49.76%，其中 PD 的贡献率最大（17.39%），超过了 AH（17.22%）和 AHSD（15.25%）。

在夏季，商业区、工业区和公共服务区中，三维建筑形态（除 SVF 外）对地表温度的贡献率普遍高于二维景观格局，其中 AH 的贡献率最高（22.15%），其次是 BVD（15.27%）和 AHSD（14.63%）；在绿地广场，SVF 的贡献率最大（15.03%），同时 PG、LSI、和 LPI 的贡献率均超过 10%；居民区中，AH 对地表温度的贡献率远高于其他指标，达到 25.81%，起主导作用；在交通设施区域，二维景观的总贡献率达到 56.77%，其中 PG 的影响最为突出，达到 16.52%。

在秋季，AH 对商业区、工业区和居民区的地表温度具有显著影响，贡献率分别为 25.47%、16.07% 和 31.09%，是主要的影响因子；在绿地广场，除了 AH、AHSD 两个主要因素外，二维景观格局的综合贡献率也较高，达到 49.25%；而在交通设施区域，AHSD 和 AH 的影响尤为突出，两者的贡献率共计 57.77%，对该功能区的热环境格局起到了关键作用。

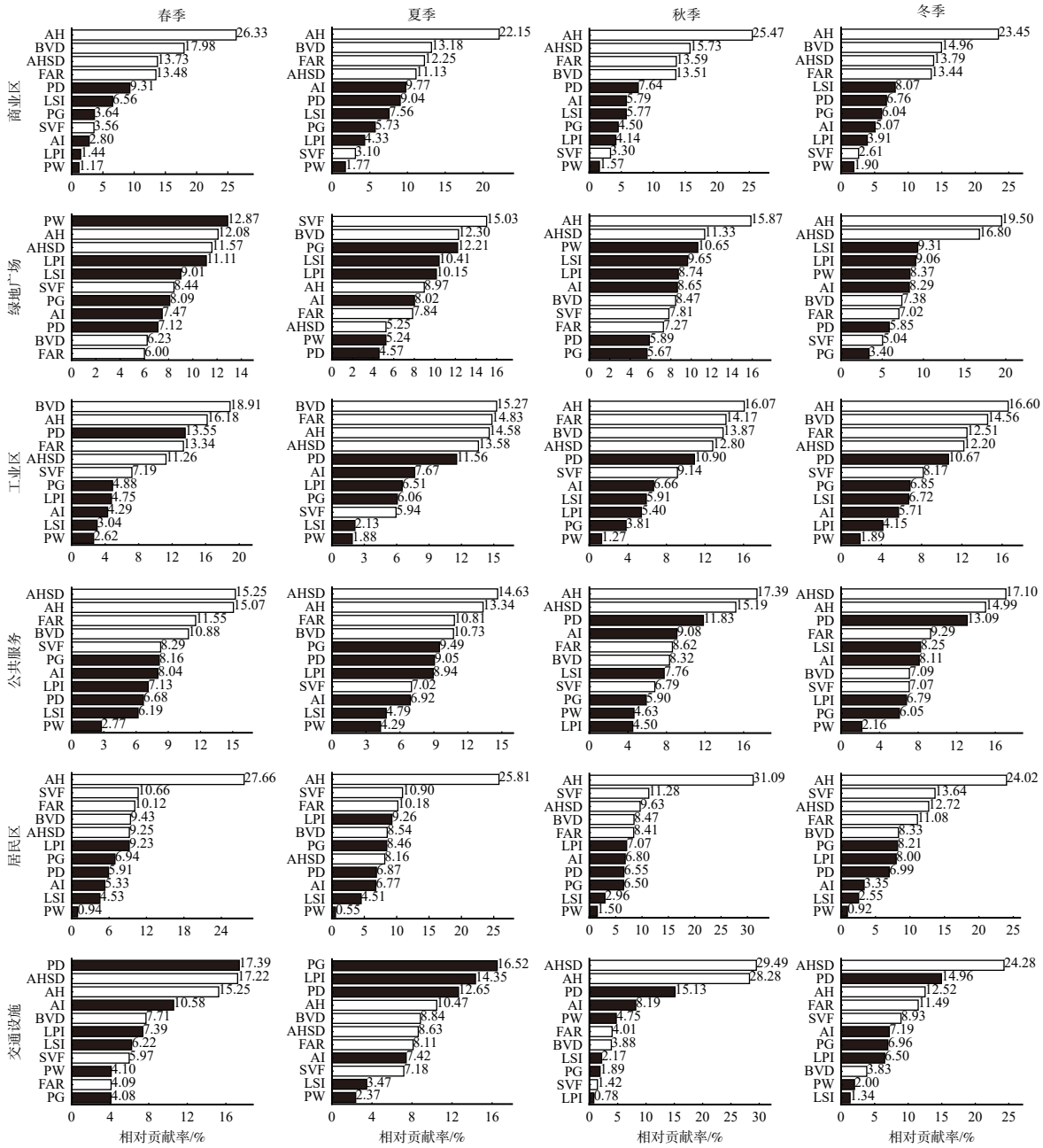
在冬季，三维建筑形态对地表温度贡献率在居民区达到最大（69.79%），其次为商业区（68.25%）和工业区（64.04%）；而在公共服务区，二维景观对地表温度的影响最为显著（44.46%），其次为绿地广场（44.28%）；在交通设施用地，除 PD 外，三维建筑形态的影响同样较为突出，其中 AHSD 的贡献率达到 24.28%。

2.4　城市形态对地表温度影响的边际效应分析

为进一步明确主导因素与 LST 的关联特征，基于各指标的贡献度排序，每个季节选取 4 个主要指标，分析其对地表温度的边际效应，如图 6 ~ 9。结果表明，城市形态对地表温度存在非线性影响；同一指标在相同季节所产生的最大增温和降温效应在不同城市功能区之间存在差异。

在春季（图 6），AH 和 AHSD 是商业区、绿地广场、公共服务和交通设施区稳定的降温因子。其中，AH 在公共服务区表现出最佳的降温效果（0.46 ℃），而 AHSD 在交通设施区降温效果最为显著（0.98 ℃）；FAR 和 BVD 在商业区、工业区、公共服务区及居民区表现为稳定的升温作用，两者在工业区降温幅度最大，分别为 1.25 和 1.30 ℃；此外，LPI、AI 分别在绿地广场和交通设施区域呈现显著的增温作用，而 PW、PD 则表现出相反的作用效果。

在夏季（图 7），城市形态对商业区、工业区和公共服务区地表温度的影响规律与春季相似。在商业区，AH 和 AHSD 降温效果最为突出，分别达到 2.10 和 1.20 ℃，BVD 则表现出明显的升温作用（0.94 ℃）；工业区中，FAR 的升温效应明显，达 1.77 ℃；在绿地广场，SVF、PG 和 LSI 均具有良好的降温效果，其中 SVF 降温最为明显（1.20 ℃），其次为 PG（0.85 ℃）和 LSI（0.64 ℃）；在居民区，AH、SVF 是主要的降温因子，而 LPI 和 FAR 则表现出明显的升温作用；值得注意的是，在交通设施区域，原本具有显著降温效果的 AH 却表现出异常的增温现象。这归因于高强度的人流及车辆活动在此产生大量人为热，抵消了 AH 的遮阴效果。相比之下，PG 和 PD 在该区域表现出较好的降温效果。



白色表示三维建筑形态，包括容积率FAR、天空可视因子SVF、平均建筑高度AH、建筑体积密度BVD、以及建筑高度标准差AHSD；黑色表示二维景观指标，包括斑块密度BD、景观形状指数LSI、聚集指数AI、最大斑块指数LPI、绿地比例PG以及水体比例PW。

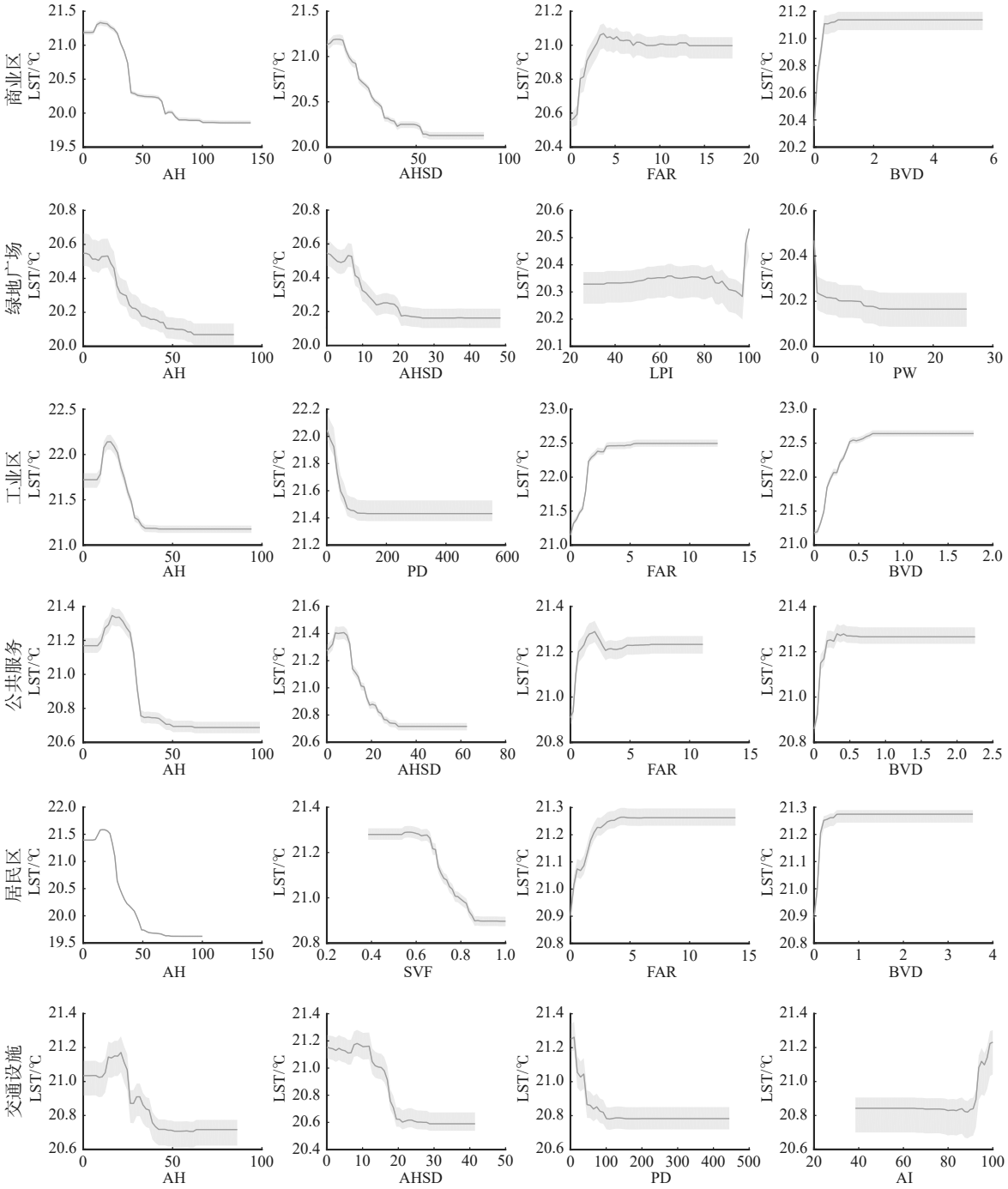
图 5 城市形态指标对地表温度的相对贡献率

Fig. 5 Relative contribution rates of urban morphology indexes to LST

表 7 随机森林回归性能统计分析

Tab. 7 Statistical analysis of random forest regression performance

季节	项目	商业区	绿地广场	工业区	公共服务	居民区	交通设施
春季	R^2	0.557	0.501	0.564	0.587	0.565	0.512
	RMSE	1.193	0.986	1.488	1.279	1.049	1.114
夏季	R^2	0.527	0.535	0.591	0.475	0.590	0.548
	RMSE	1.637	1.497	2.049	1.526	1.614	1.826
秋季	R^2	0.558	0.491	0.523	0.493	0.509	0.506
	RMSE	1.258	0.981	1.247	0.961	0.943	0.977
冬季	R^2	0.528	0.520	0.601	0.531	0.508	0.497
	RMSE	1.049	0.679	1.158	0.867	0.785	0.746



曲线周围的阴影部分代表自变量对因变量作用的波动范围。下同。

图 6　春季各城市功能区地表温度主要影响因子的边际效应

Fig. 6　Marginal effect of main influencing factors of LST across UFZs in spring

在秋季(图 8)，AH 和 AHSD 的降温效应不受功能区类型的影响，AH 的最大降温效应发生在居民区(1.25 ℃)，而 AHSD 则在商业区达到最大降温效果(0.98 ℃)；BVD 和 FAR 在商业区和工业区均呈现明显的升温作用，两者的最大增温效果均发生在工业区，分别达到 0.96 ℃ 和 1.24 ℃；在公共服务和交通设施区域，AI 表现出明显的升温效应，PD 则表现出显著的降温作用；在绿地广场，LSI 和 PW 均表现出良好的降温效果，且 LSI 的降温效果优于 PW；此外，BVD 在居民区表现出明显的升温效应。

在冬季(图 9)，AH 在居民区表现出最佳降温效果(1.1 ℃)，AHSD 则在商业区表现出良好的降温作用(0.72 ℃)；FAR 在商业区、工业区和公共服务区均呈现增温效应，但在公共服务区和居民区呈现出先增温后降温最后趋于稳定的非线性变化特征；在绿地广场，LSI 具有显著的降温作用，而 LPI 则表现为先保持平稳，随会出现小幅度的降温，当 LPI 达到 90% 之后，增温效果明显加剧；BVD 在商业区和工

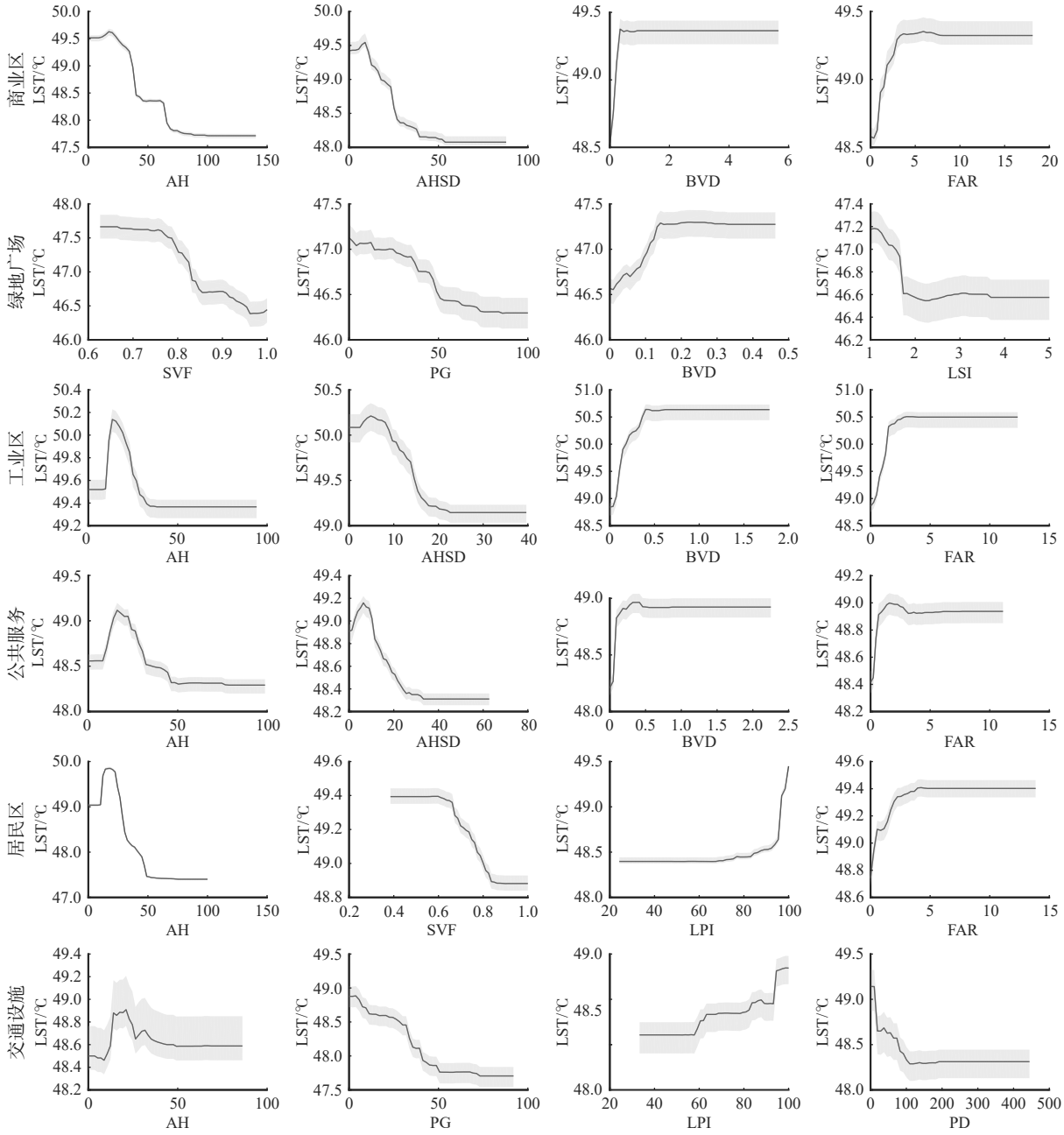


图 7 夏季各城市功能区地表温度主要影响因子的边际效应

Fig. 7 Marginal effect of main influencing factors of LST across UFZs in summer

业区均表现出显著的增温作用，其中工业区增幅最大（0.88 ℃）；PD 在公共服务和交通设施区域具有良好的降温效果；SVF 则在居民区表现出显著的降温作用。

3 讨 论

3.1 城市功能区季节性地表温度空间特征

地表温度在四季中呈现显著的时空分异特征。高温区主要集中于居民区和工业区，低温区则多分布于绿地、河流等自然地表，这一现象在夏季尤为突出。居民区与工业区广泛使用沥青、混凝土等高热容材料，其白天吸收的太阳辐射远大于出射辐射，促使人工地表与大气间发生热量交换，能量以感热通量形式释放，驱动地表升温；此外，工业区作为人为热排放的主要来源，在生产过程中产生的大量废热直接释放到空气中，增强了对流和湍流作用，进一步破坏了局部能量收支平衡与边界层结构。相反，自然地表植被在温暖季节蒸腾作用强烈，潜热通量在能量分配中占据主导，有效消耗了太阳辐射，形成明显的冷却效应，使植被在春、夏、秋季表现为热汇；然而在冬季，城市热环境分布规律被打破。高、低温区的聚集效应减弱，且值得注意的是，绿地广场区域的温度反超部分建成区。随着植被的生理活动减弱与叶片脱落，蒸腾作用与遮阴效果基本丧失，太阳辐射更多转化为感热，导致绿地等区域冷却效应大幅

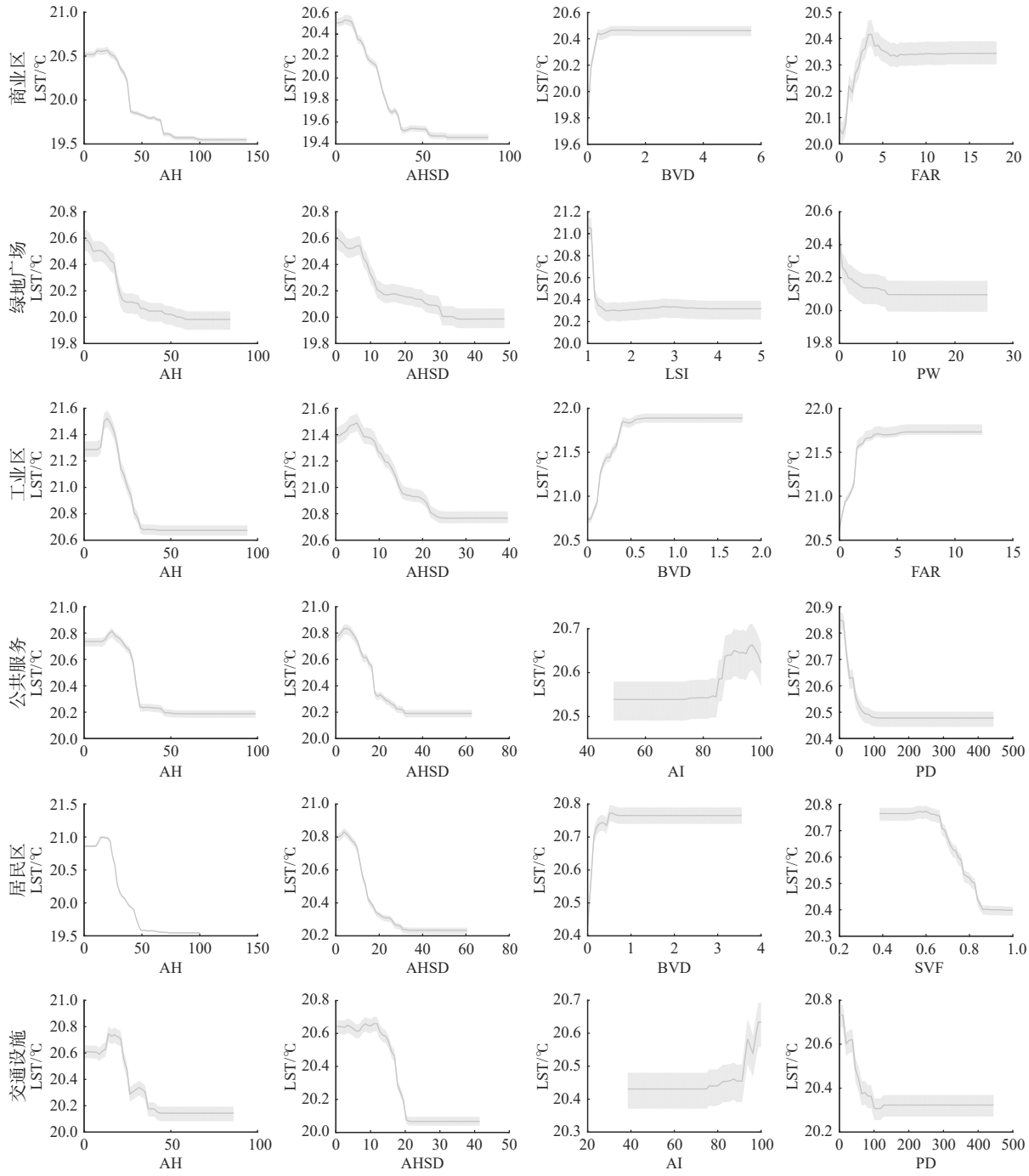


图 8　秋季城市功能区地表温度主要影响因子的边际效应

Fig. 8　Marginal effect of main influencing factors of LST across UFZs in autumn

减弱。Yu 等[33]的研究进一步印证了这一能量分配机制的季节性转换，这些结果为理解城市热环境的空间动态变化提供启示。

3.2　城市形态对四季地表温度影响差异

城市形态通过改变地表结构和风场环境影响热环境[34]。研究表明，城市形态对地表温度的影响在秋冬季节具有相似性，春季和夏季则表现出显著差异。秋冬季节，三维建筑形态对地表温度的影响尤为突出，该季节太阳高度角较小，建筑物遮阴效应增强，使建筑形态成为温度变化的主导因素；而春夏季节，太阳高度角增大，辐射强度提升，建筑物的遮阴效果减弱，同时，植被蒸腾和水体蒸发冷却作用增强，使具有高植被覆盖（＞30%）和水体占比（＞8%）的景观要素通过潜热交换对地表温度产生更强的调节作用。

此外，城市形态对地表温度的影响在不同功能区存在明显差异。春夏季节，商业区、工业区、公共服务区和居民区的地表温度主要受三维建筑形态（如 AH、BVD 和 FAR）的影响。这些区域的高层建筑通过增强阴影投射减少地表短波辐射接收，但过高的建筑密度和容积率会严重阻碍通风，限制感热

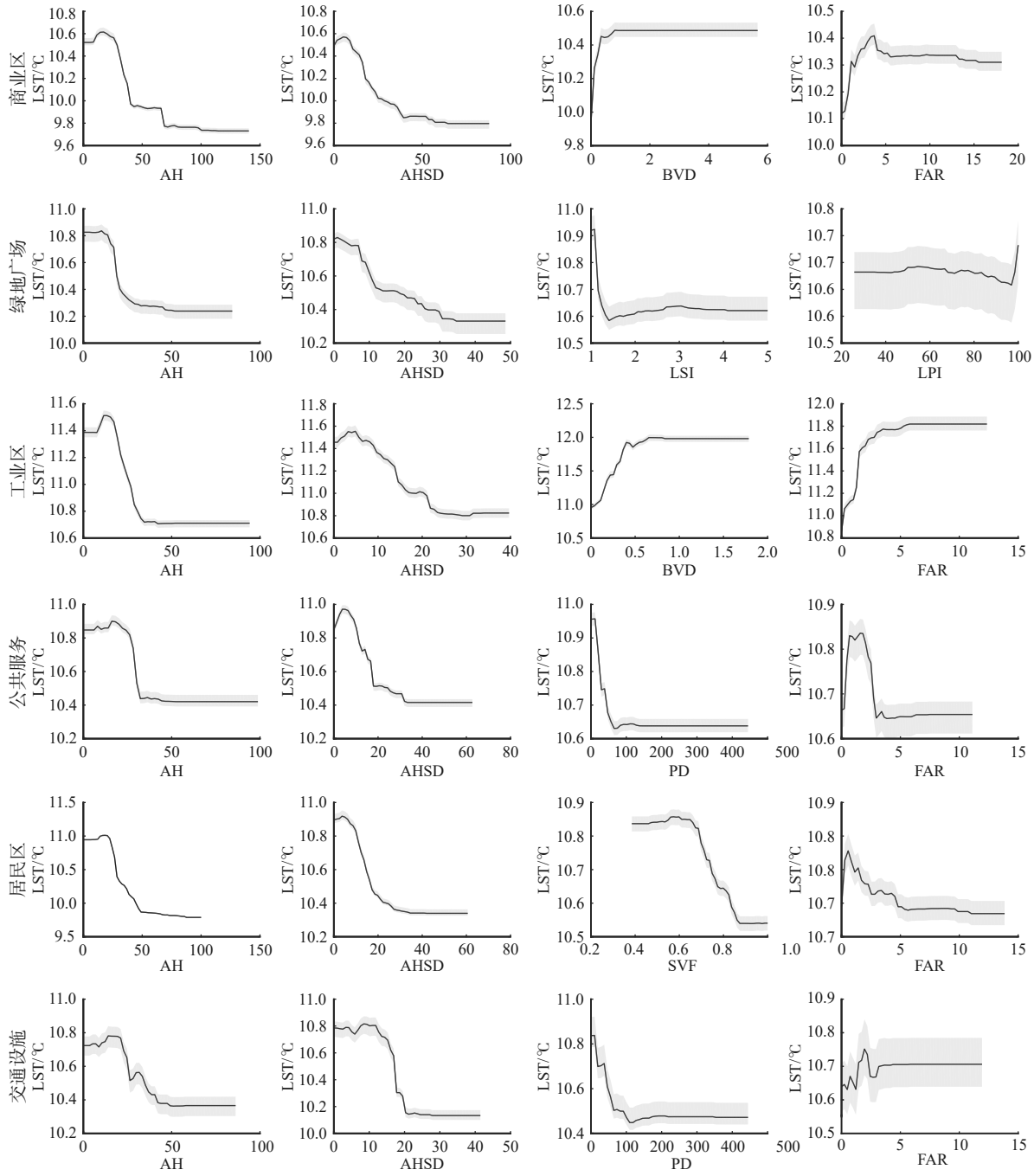


图 9 冬季城市功能区地表温度主要影响因子的边际效应

Fig. 9 Marginal effect of main influencing factors of LST across UFZs in winter

通量的扩散，使得热量在近地表积聚。在建筑稀疏的绿地广场和交通设施区域，二维景观格局（如 PW、PG 和 PD）的调控作用占主导，水体的蒸发冷却和植被的蒸腾作用能有效调节局部热环境。秋冬季节，在居民区、商业区、工业区及交通设施区域，三维建筑形态对地表温度的影响均超过二维景观格局；相比之下，在绿地广场和公共服务区域，二维景观格局的热环境调控作用更为突出。这表明寒冷季节植被的调控作用减弱，不透水面对地表温度影响更为明显。

3.3 不同功能区城市形态对四季地表温度的边际效应

尽管已有研究分析了城市形态对地表温度的边际效应，但鲜有从功能区角度探讨其季节差异。研究表明，城市形态对地表温度的影响存在阈值效应。BVD 和 FAR 在四季均表现为稳定的增温因子，而 AH 和 AHSD 则持续发挥着降温作用。结合现有研究，随着 AH 增加，阴影遮荫使得地表热交换增强，地表温度出现一定程度的下降，这与 Guo 等[35]的研究结果相吻合。因此，在高度城市化区域应合理协调建筑密度与高度，避免高密度、低高度的开发模式，倡导合理的建筑高度与错落有致的空间布局，是改善热环境的关键。

在春季，AH 是商业区和居民区关键的降温指标。

当 AH > 20 m 时，降温效果随高度增加而增强，其分别在 82 和 48 m 时达到最佳降温效果。这主要源于两者空间结构与热负荷特征的差异。商业区建筑密度高，低矮建筑易形成“建筑森林”，严重阻碍近地面通风。建议在关键节点布局更高建筑，以捕捉高空风力，增强街谷内的垂直混合和水平通风。居民区建筑密度较低，且普遍设有社区景观绿地，过高的建筑会遮挡阳光，削弱植被的蒸腾降温能力。绿地广场中，PW 的降温效果最显著，阈值为 12%。建议在满足景观生态需求的基础上合理调控水体比例，增强其与周围绿地的渗透联系，以最大化其热舒适效益。工业区中，BVD 是主要升温因子，当 BVD > 0.7 时，增温趋于平稳。考虑到工业区集约用地的发展导向，建议在高密度区域设置间隔绿地或屋顶绿化以改善局地热环境。在公共服务区，当 AHSD > 10 m 时，降温效果明显。错落有致的天际线有助于促进空气对流与局部环流，建议在规划设计中充分考虑建筑高度的梯度变化，有意识地塑造起伏有序的建筑天际线，以增强通风散热。

在夏季，商业区和居民区的 AH 持续发挥显著降温作用、工业区的 BVD 保持明显增温，公共服务区的 AHSD 同样对降温有积极影响，反映出这些形态要素对热环境的稳定性影响。在绿地广场，SVF 是主要的降温指标，当 SVF > 0.75 时，降温效果显著提升，表明开阔的绿地空间有助于增强通风和散热。同时，结合 LSI 的边缘降温效应，建议在集中栽植高大乔木的同时辅以低矮灌木，构建层次清晰，通风良好的绿化结构，在保证高天空开阔度的前提下最大限度发挥自然植被的降温作用。在交通设施区域，PG 呈现显著降温效应，当 PG > 30% 时降温效果更为明显。植被通过蒸腾吸热和辐射阻隔形成连续遮阴网络，有效提升蒸腾效率，减少下垫面热量存储。鉴于交通设施区域需兼顾通行效率问题，建议在道路隔离带、人行区域增加绿地比例，构建连贯的林荫体系与生态化铺装，在满足交通功能的同时强化降温效果。

在秋季和冬季，商业区、绿地广场、工业区和居民区的降温效果主要由 AH 主导，其最优阈值分别为 72、25、37 和 43 m。而公共服务和交通设施区域的降温则更依赖于 AHSD 的调控，当 AHSD >10 m 时，AHSD 的增加使得降温响应明显。较高的建筑高度通过增强垂直方向的阴影遮蔽和促进街谷通风有效减少热量聚集，而较大的 AHSD 会形成更强的热力梯度，驱动空气流动；与此同时，非均匀的建筑高度分布实现动态遮阴的同时打破静风环境，促进了空气流交换，使得降温效果增强。

3.4　城市规划管理启示

随着全球变暖持续加剧，地球气候系统正面临严峻挑战。城市规划作为综合治理的关键抓手，在缓解城市热环境问题中发挥着重要作用[36–37]。研究发现，通过城市形态优化可在局部区域实现约 1 ℃的降温。虽然这一数值看似有限，但结合全球气候与城市人居环境的严峻现实，其科学价值与实践意义不容忽视。经世界气象组织确认，2024 年已成为有气象记录以来最炎热的一年，全球平均气温较工业化前上升约 1.55 ℃，已突破《巴黎协定》设定的 1.5 ℃ 温控阈值[38]。相关研究指出，全球平均气温每上升 0.1 ℃，都会加剧生态系统的破坏，显著增加如西南极冰盖、大西洋径向翻转环流及亚马逊雨林等关键生态系统临界点触发风险，升温超过 1.5 ℃，将对贫困和脆弱人群构成严重的生存威胁[39]。在此背景下，任何局部有效的人工干预，都是对全球温控目标的实质性响应。

研究通过解析不同功能区城市形态对地表温度的季节性影响，为上海中心城区热环境改善提供了精细化的规划指引。春季，绿地广场中水体占比 PW 的降温效果明显，应充分发挥水体的调节作用，科学布局湖泊、湿地、人工林带等生态要素，构建复合型生态调节系统；交通设施区域则可通过提高斑块密度 PD 实现降温，建议设置分散式绿岛、带状绿化廊道并利用边角空间构建立体绿化，提升区域内景观斑块的多样性与离散性，促进热量扩散与局地通风。夏季，景观形状指数 LSI 在绿地广场区域的降温效果明显，斑块密度 PD 在交通设施区域具有显著降温效果，绿地占比 PG 则在上述两类功能区中均表现出良好的降温效果。因此，建议增加这些区域的植被与绿地覆盖，空间上宜采用自然、不规则的斑块设计，避免不透水面的大面积连片分布。这有助于增强斑块间的能量交换，提高区域景观破碎化程度，实现有效降温。秋冬季节，应重视高层建筑的冷却效应，合理控制建筑高度与密度以降低地表温度。在老旧城区更新中，建议将建筑高度控制在 48 m 左右以获得最佳降温效果；新建项目应通过用地规划合理控制地块开发强度，如设置最大容积率，防止建筑过于密集。建筑布局宜采用错落式、组团化设计，避免连续板状或行列式密集排列，保障空气流通和热量交换；绿地设计需兼顾常绿和落叶树种的合理搭配，在保证冬季阳光通透的同时兼顾防风和导风需求。

4　结　　论

本文在功能区划分的基础上，分析了不同功能

区地表温度的时空变化特征；采用随机森林回归模型，系统探讨了城市形态（包括二维景观和三维建筑）对地表温度季节变化的影响。

（1）上海中心城区以居民区、商业区和公共服务区为主，其中居民区用地占比最大，达到 44.4%。不同 UFZ 地表温度表现出明显的空间异质性。工业区四季均为高温区，居民区和公共服务区多处于高温或次高温范围；绿地广场则表现出明显的降温作用，尤其在夏季，连续分布的公园湿地与密集水网共同作用，形成明显的低温集聚区。

（2）AH、AHSD 是影响各季节地表温度的关键因子。在春季，建筑指标（如 BVD、FAR）对商业区和工业区 LST 的贡献率均超过 30%；冬季 SVF 对居民区 LST 影响显著，贡献率为 13.64%；景观指标（如 PW、LPI、LSI）则是影响绿地广场 LST 的重要影响因子，综合贡献率在春季和秋季分别达 32.99% 和 29.04%。

（3）边际效应显示，AH 与 AHSD 对 LST 存在负向影响的阈值效应。当 AH > 20 m，AHSD > 10 m 时，降温效应显著增强。在绿地广场，当 PG > 36% 时，降温效应显著提升，而 PW > 12% 后降温达到峰值。冬季因太阳高度角较低，高 FAR 地块（如居民区和公共服务区）通过连续阴影形成明显降温。BVD 在所有 UFZ 均表现为增温效应，工业区尤为突出，当 BVD > 0.65 时，增温趋于平稳。

本研究为理解不同功能区城市形态的热环境效应提供了参考依据，但功能区的识别方法仍可改进，主要依据 POI 频率密度和比率进行功能区判定，方法相对单一，对功能混合度高与空间结构复杂的区域难以精确辨识，可能影响局部热环境影响机制的深入揭示。未来研究可结合 POI 类型、密度及空间规模等多维特征，构建更精细的功能区分类体系，以期更精准地解析不同功能区热环境影响机制。

参 考 文 献

[1] Han D, An H, Wang F, et al. Understanding seasonal contributions of urban morphology to thermal environment based on boosted regression tree approach [J]. Building and Environment, 2022, 226: 109770.

[2] Ngarambe J, Joen S J, Han C H, et al. Exploring the relationship between particulate matter, CO, SO_2, NO_2, O_3 and urban heat island in Seoul, Korea [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 403: 123615.

[3] He B J, Ding L, Prasad D. Urban ventilation and its potential for local warming mitigation: a field experiment in an open low-rise gridiron precinct [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 55: 102028.

[4] 宋爽, 王韶晗, 弓悦, 等. 基于复杂网络理论的黔中城市群冷岛网络优化与热环境缓解 [J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(1): 166−179.
Song S, Wang S H, Gong Y, et al. Optimization of cold island network and thermal environment mitigation in urban agglomeration based on complex network theory in central Guizhou Province, southwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(1): 166−179.

[5] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2023: AR6 synthesis report: longer report[R]. Geneva: IPCC, 2023.

[6] Guo A, Yang J, Xiao X M, et al. Influences of urban spatial form on urban heat island effects at the community level in China [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 53: 101972.

[7] 范强, 相梦雪, 张兵, 等. 基于“季节−源汇”下的济南市主城区热环境驱动因素分析 [J]. 生态环境学报, 2026, 35(1): 75−87.
Fan Q, Xiang M X, Zhang B, et al. Based on the analysis of the driving factors of thermal environment in the main urban area of Jinan City under the “seasonal-source-sink” situation [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2026, 35(1): 75−87.

[8] 王森, 曾穗平, 卢鋆镆, 等. 郑州城市形态对热岛强度影响的城市发展梯度差异 [J]. 环境科学, 2025, 46(3): 1924−1963.
Wang S, Zeng H P, Lu J M, et al. Differentiation impact of urban form on heat island intensity along urban development gradients in Zhengzhou [J]. Environmental Science, 2025, 46(3): 1924−1963.

[9] Wang R, Voogt J, Ren C, et al. Spatial-temporal variations of surface urban heat island: an application of local climate zone into large Chinese cities [J]. Building and Environment, 2022, 222: 109378.

[10] 王丽, 成俞佳. 空间形态差异对城市发展梯度的热岛强度影响: 以合肥市为例 [J]. 经济地理, 2026, 46(1): 108−118.
Wang L, Cheng Y J. Gradient differences of urban development regarding the impact of urban spatial form on the intensity of the urban heat island: a case study for Hefei City [J]. Economic Geography, 2026, 46(1): 108−118.

[11] Hu D, Meng Q, Schlink U, et al. How do urban morphological blocks shape spatial patterns of land surface temperature over different seasons? A multifactorial driving analysis of Beijing, China [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022, 106: 102648.

[12] Zhang Q, Zhou D, Xu D, et al. Correlation between cooling effect of green space and surrounding urban spatial form: evidence from 36 urban green spaces [J]. Building and Environment, 2022, 222: 109375.

[13] Zhou L, Hu F, Wang B, et al. Relationship between urban landscape structure and land surface temperature: spatial hierarchy and interaction effects [J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 80: 103795.

[14] Tang L, Zhan Q, Fan Y, et al. Exploring the impacts of greenspace spatial patterns on land surface temperature across different urban functional zones: a case study in Wuhan metropolitan area, China [J]. Ecological Indicators, 2023, 146: 109787.

[15] Zhang X, Du S, Wang Q. Hierarchical semantic cognition for urban functional zones with VHR satellite images and POI data [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 132: 170−184.

[16] Chen Y, Yang J, Yang R, et al. Contribution of urban functional zones to the spatial distribution of urban thermal environment [J]. Building and Environment, 2022, 216: 109000.

[17] 王楚, 王亮, 赵习枝, 等. 北京市城市功能类型对地表温度的季节性影响测度 [J]. 测绘科学, 2024, 49(2): 199−208.
Wang C, Wang L, Zhao X Z, et al. Measuring the seasonal impact of Beijing urban functional types on land surface temperature [J]. Science of Surveying and Mapping, 2024, 49(2): 199−208.

[18] Hu Y, Dai Z, Guldmann J M. Modeling the impact of 2D/3D urban indicators on the urban heat island over different seasons: a boosted regression tree approach [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 266: 110424.

[19] Yao X, Zhu Z, Zhou X, et al. Investigating the effects of urban morphological factors on seasonal land surface temperature in a "Furnace City" from a block perspective [J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 86: 104165.

[20] Li H, Li Y, Wang T, et al. Quantifying 3D building form effects on urban land surface temperature and modeling seasonal correlation patterns [J]. Building and Environment, 2021, 204: 108132.

[21] 敖翔宇, 谈建国, 支星, 等. 上海城市热岛与热浪协同作用及其影响因子 [J]. 地理学报, 2019, 74(9): 1789−1802.
Ao X Y, Tan J G, Zhi X, et al. Synergistic effects of urban heat island and heat waves in Shanghai and their influencing factors [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(9): 1789−1802.

[22] 张立君, 李津莉, 王琦, 等. 基于随机森林算法的城市形态对热环境影响作用研究: 以广州市中心地区为例 [J]. 环境科学导刊, 2023, 42(2): 9−16.
Zhang L J, Li J L, Wang Q, et al. Research on the effect of urban form on thermal environment based on random forest algorithm: a case study of the central area of Guangzhou [J]. Environmental Science Survey, 2023, 42(2): 9−16.

[23] Mansouri S T, Zarghami E. Investigating the effect of the physical layout of the architecture of high-rise buildings, residential complexes, and urban heat islands [J]. Energy and Built Environment, 2025, 6(1): 1−17.

[24] 张天蛟, 刘刚. 提高生态位模型时间转移能力的方法研究 [J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(2): 98−105.
Zhang T J, Liu G. Research on methods for improving temporal transferability of niche models [J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(2): 98−105.

[25] Hu Y, Han Y. Identification of urban functional areas based on POI data: a case study of the Guangzhou economic and technological development zone [J]. Sustainability, 2019, 11(5): 1385.

[26] Wang Z, Ma D, Sun D, et al. Identification and analysis of urban functional area in Hangzhou based on OSM and POI data [J]. PLoS one, 2021, 16(5): e0251988.

[27] 丁彦文, 许捍卫, 汪成昊. 融合 OSM 路网与 POI 数据的城市功能区识别研究 [J]. 地理与地理信息科学, 2020, 36(4): 57−63.
Ding Y W, Xu H W, Wang C H. Research on urban functional zone identification by integrating OSM road network and POI data [J]. Geography and Geo-Information Science, 2020, 36(4): 57−63.

[28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市用地分类与规划建设用地标准: GB/T 50137-2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Urban land use classification and planning construction land standard: GB/T 50137-2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.

[29] Graham M H. Confronting multicollinearity in ecological multiple regression [J]. Ecology, 2003, 84(11): 2809−2815.

[30] 多玲花, 段雅卿, 王俊淇. 不同格网尺度下城市形态对北京四环内地表温度的季节性影响 [J/OL]. 应用生态学报, 1−14[2026−02−22]. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202603.022.
Duo L H, Duan Y Q, Wang J Q. Seasonal effects of urban morphology on surface temperature at different grid scales in Beijing's Fourth Ring Road[J/OL]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1−14[2026−02−22]. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202603.022.

[31] Zhang Z, Luan W, Yang J, et al. The influences of 2D/3D urban morphology on land surface temperature at the block scale in Chinese megacities [J]. Urban Climate, 2023, 49: 101553.

[32] 谭洁, 危千骏, 廖朝阳, 等. 基于 XGBoost-SHAP 可解释机器学习模型的城市形态与地表温度的关系 [J]. 应用生态学报, 2025, 36(3): 659−670.
Tan J, Wei Q J, Liao C Y, et al. Relationship between urban form and surface temperature based on XGBoost SHAP interpretable machine learning model [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(3): 659−670.

[33] Yu Z, Chen T, Yang G, et al. Quantifying seasonal and diurnal contributions of urban landscapes to heat energy dynamics [J]. Applied Energy, 2020, 264: 114724.

[34] Liu Y, Wang Z, Liu X, et al. Complexity of the relationship between 2D/3D urban morphology and the land surface temperature: a multiscale perspective [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28: 66804−66818.

[35] Guo A, Yue W, Yang J, et al. Divergent impact of urban 2D/3D morphology on thermal environment along urban gradients [J]. Urban Climate, 2022, 45: 101278.

[36] Li W, Schmidt S. Can spatial patterns mitigate the urban heat island effect? Evidence from German metropolitan regions [J]. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 2024, 51(8): 1948−1964.

[37] 陈少枫, 翁飞帆, 邱羽薇, 等. 都市圈冷热岛空间网络构建与优化: 可解释机器学习与电路理论的融合 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(7): 152−166.
Chen S F, Weng F F, Qiu Y W, et al. Construction and optimization of cold and heat island networks for metropolitan area: an integration of interpretable machine learning and circuit theory [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(7): 152−166.

[38] World Meteorological Organization. WMO confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55 ℃ above pre-industrial level[R]. Geneva: WMO, 2025.

[39] Möller T, Högner A E, Schleussner C F, et al. Achieving net zero greenhouse gas emissions critical to limit climate tipping risks [J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 6192.

（责任编辑　范　娟　李　契
责任编委　李　雄）