基于局部气候分区的武汉市多形态街区绿色空间 2D/3D 指标差异性及其影响因素*

殷利华[1,2] 任卓玥[1] 陈 明[3]

1 华中科技大学建筑与城市规划学院 武汉 430074
2 湖北省城镇化工程技术研究中心 武汉 430074
3 福建农林大学风景园林与艺术学院 福州 350100

摘要：【目的】根据局部气候分区（LCZ）特征揭示高密度城市中多种街区形态与绿色空间特征的复杂关系，为城市绿色空间规划管理提供科学依据。【方法】以武汉市主城区为研究对象，基于 LCZ 对 506 个控规单元的街区形态进行划分，构建城市 2D/3D 绿色空间指标体系；运用单因素方差分析、地理探测器等方法，深入分析不同 LCZ 下绿色空间指标的差异性及其影响因素。【结果】1）武汉市主城区 LCZ 分布具有空间自相关性，不同 LCZ 的绿色空间 2D/3D 指标差异显著。2）LCZ 类型与平均斑块面积（AREA_MN）、冠层高度标准差（SDCH）、绿容积率（GVR）3 种指标具有显著相关关系。3）建成环境因素（建筑密度、平均建筑高度等）对 LCZ 分类影响显著，而社会经济因素（人口密度、GDP 等）影响较小。【结论】1）街区形态类型通过建成环境因素主导绿色空间 2D/3D 指标的差异性。2）2D/3D 的研究视角有助于拓展城市街区的合理规划设计，促进城市可持续发展，提升生态环境质量和居民生活品质。

关键词：局部气候分区；街区形态；绿色空间指标体系；地理探测器；街景空间
DOI：10.12169/zgcsly.2025.05.27.0001

Differences in 2D/3D Indicators of Green Space in Multi-form Neighborhoods in Wuhan City Based on Local Climate Zone and Its Influencing Factors

Yin Lihua[1,2] Ren Zhouyue[1] Chen Ming[3]

(1. School of Architecture & Urban Planning, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Hubei Province Urbanization Engineering Technology Research Center, Wuhan 430074, China; 3. College of Landscape Architecture and Art, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350100, China)

Abstract: 【Objective】 The study aims to reveal the complicated relationship between multi-form neighborhood morphology and green space characteristics in line with the feature of local climate zone (LCZ), and provide a scientific basis for the planning and management of urban green space. 【Method】 The neighborhood morphology of 506 control units in Wuhan's central urban area is classified based on the LCZ to establish a 2D/3D green space index system, and the indicators' differences and influence factors are analyzed using ANOVA and geodetectors. 【Result】 1) LCZ distribution in Wuhan's central urban area shows spatial autocorrelation with significant variations in their 2D/3D green space; 2) LCZ type is strongly correlated with AREA_MN, SDCH, and GVR; and 3) The factors in relation to the built

收稿日期：2025-05-27
* 基金项目：国家自然科学基金项目（52208058、52278064）
第一作者：殷利华（1977-），女，博士，教授，研究方向为工程景观、生态修复等。E-mail：yinlihua2012@hust.edu.cn
通信作者：陈明（1991-），男，博士，副教授，研究方向为风景园林规划与设计、绿色基础设施等。E-mail：chen_m@fafu.edu.cn

environment (e. g., building density) have substantial influence on the categorization of LCZ, while socio-economic factors (e. g., GDP and population density) have minimal influence. 【Conclusion】 1) Neighborhood morphology type dominates the variation in the 2D/3D green space indicator via built environment; and 2) The 2D/3D approach advances sustainable neighborhood design, promotes sustainable urban development, and enhances the ecological and life quality.

Keywords: local climate zone (LCZ); neighborhood morphology; green space indicator system; Geodetector; streetscape space

我国正处于快速城市化进程中，常住人口城镇化率已从 2012 年的 53.10%提升至 2023 年的 66.16%[1]。这一进程深刻改变了城市土地利用模式，形成了复杂多样的城市绿色空间[2]。绿色空间对维持生态系统平衡至关重要，其量化指标是推动可持续城市规划的关键切入点[3-5]。

当前，城市绿色空间研究多集中为二维层面。景观格局指标广泛用于刻画绿色空间特征及变化，并常结合模型探讨其与城市空间异质性的关联。形态学空间格局分析（Morphological Spatial Pattern Analysis，MSPA）作为新兴方法，凭借其空间尺度兼容性和可视化能力，为二维绿色空间形态分析提供了补充[6]。然而，快速城市化不仅改变了二维地表形态，更驱动了显著的垂直空间发展，形成了复杂的三维城市景观，三维视角研究亟需纳入考量[7]。已有研究尝试整合 2D（如边缘密度、斑块密度）与 3D 指标（如平均建筑高度、天空开阔度）来探究其对地表温度的影响，凸显三维指标的重要性[8]。

在街区尺度上，出于数据便捷性和结果可比性，现有研究多依赖规则网格、缓冲区或行政区划等标准化空间单元进行绿色空间分析[9]。但这些单元往往难以匹配因自然生长或依地形发展形成的不规则、自组织街区形态，导致对局部绿色空间特征的识别存在偏差[10]。因此，构建一种能有效刻画城市三维形态异质性、并具备广泛适用性的分类框架至关重要。

局部气候分区（local climate zones，LCZ）正是为解决城市形态与气候过程（特别是热岛效应）关系提出的标准化框架，其优势在于综合了二维地表覆盖和三维建筑形态特征，为理解城市空间异质性提供了强有力的工具[11]。然而，LCZ 在城市绿色空间研究中的应用仍显不足。现有划分方法主要分两类：基于详实用地数据的指标计算法[12]（精度高但耗时），基于遥感影像的机器学习法[13]（效率高但精度受限）。此外，部分基于 WUDAPT 或遥感影像的分类更侧重土地覆盖特征分析[14]。因此，有必要针对复杂街区形态实现更精准的 LCZ 划分，并拓展其在绿色空间格局分析中的应用。

综上，当前研究存在 3 方面局限：1）侧重二维指标，三维特征关注不足；2）标准化单元难以匹配复杂街区形态；3）缺乏结合多维（2D/3D）指标与不同街区形态的系统分析。因此，本研究尝试以武汉市主城区为例，结合 LCZ 分区，突破传统二维视角，探索不同街区形态下 2D/3D 绿色空间指标的差异性与相关性。具体研究内容包括：1）揭示武汉市主城区 LCZ 的空间分布格局；2）分析武汉市主城区 2D/3D 绿色空间指标的差异性及相关性；3）探究武汉市主城区不同街区形态下绿色空间指标影响因素。研究旨在揭示高密度城市多种街区形态与绿色空间特征的复杂关系，为精准化绿色空间规划提供理论依据与实践参考，助力提升城市生态韧性和人居环境可持续性。

1 研究区概况

以武汉市（113°41′—115°05′E，29°58′—31°22′N）主城区为研究对象，市区面积约 8 569 km^2，人口 1 373 万。作为“四大火炉”之一，武汉市夏季极端高温超过 40℃，年均高温日数达 22 天，利用绿色空间调节改善微气候需求迫切。然而，现有绿色空间多集中在城郊，中心城区人口密集却严重“缺绿”[15]。依据《武汉市国土空间总体规划》，选取三环内约 511.96 km^2 的主城区作为研究范围（图 1）。其高密度城市形态和“郊多市少”的绿色空间分布，极具特大城市空间形态典型性[16]。

采用控制性详细规划管理单元（本文以下均简称“控规单元”）作为街区基本单元，数据源自武汉市自然资源和规划局公布信息。控规单元研究通常综合考虑自然条件、交通布局等因素，贴合城市肌理，便于规划应用，目前在城市热岛等领域研究已有相关成果[17]。武汉市主城区共约 511 个控规单元，省略 5 个水体主导单元，最终使用 506 个单元进行全街区的绿色空间特征分析（图 1）。

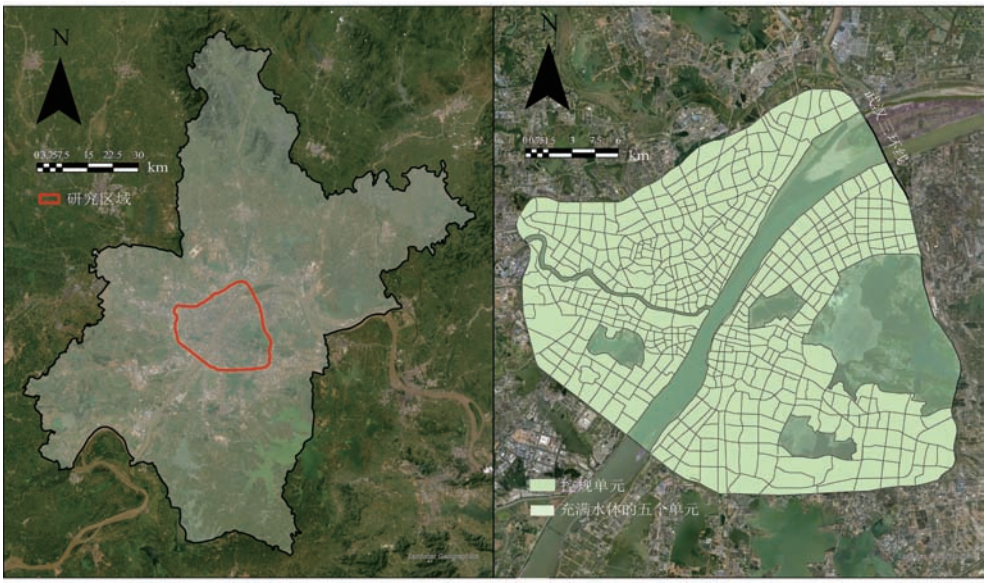


图 1　研究区域与研究单元

2　研究方法

2.1　LCZ 分类与绿色空间指标选取

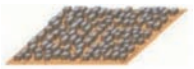
2.1.1　LCZ 分类指标

LCZ 方案为城市区域提供了有效的分类框架，已用于全球 130 多个城市热岛研究[18]。Stewart 和 Oke[11]将城市分为 17 类（含 10 类建成环境、7 类土地覆盖）。为减少指标冗余并保证解释力，本研究选取对绿色空间具有直接影响的 3 个关键指标，即平均建筑高度（H）、建筑密度（BD）和不透水表面比例（ISF），并参考我国大城市层高特点与建筑规范，将 H 划分为 3~9 m、10~47 m 和≥48 m 共 3 个层级[19]（表 1）。

表 1　LCZ 基本类别及参考指标

建筑类型 LCZ	指标	土地覆盖类型 LCZ	指标
LCZ 1：紧凑高层	H≥48 m BD：40%~60% ISF>90%	LCZ A：密林	H：/ BD<10% ISF<10%
LCZ 2：紧凑中层	H：10~47 m BD：40%~70% ISF>80%	LCZ B：疏林	H：/ BD<10% ISF<10%
LCZ 3：紧凑低层	H≤9 m BD>40% ISF>70%	LCZ C：灌木林	H：/ BD<10% ISF<10%
LCZ 4：紧凑中层	H≥48 m BD：40%~40% ISF：60%~70%	LCZ D：低矮植被	H：/ BD<10% ISF<10%
LCZ 5：开敞中层	H：10~47 m BD：20%~40% ISF：60%~80%	LCZ E：硬质地面	H：/ BD<10% ISF>90%

表 1（续）

建筑类型 LCZ	指标	土地覆盖类型 LCZ	指标
 LCZ 6：开敞低层	H≤9 m BD：20%～40% ISF：40%～70%	 LCZ F：裸地	H：/ BD<10% ISF<10%
 LCZ 7：小型低层	H：2～4 m BD>60% ISF>70%	 LCZ G：水域	H：/ BD<10% ISF<10%
 LCZ 8：大型低层	H≤9 m BD：30%～50% ISF>80%		
 LCZ 9：零散低层	H：/ BD<20% ISF：20%～40%		
 LCZ10：重工业区	H：/ BD：20%～30% ISF：50%～60%		

注：H：/表示无平均建筑高度。

2.1.2 2D 和 3D 绿色空间指标

从规模、密度、形态和聚散性 4 个维度选取平均斑块面积（AREA_MN）、斑块密度（PD）、景观形态指数（LSI）和聚集度指数（AI）作为 2D 绿色空间指标，并通过 Fragstats 4.2 计算；选取与绿色空间密切相关的冠层高度（CH）、冠层高度标准差（SDCH）和绿容积率（GVR）作为 3D 指标[20-24]（表 2）。

表 2 绿色空间指标

维度	名称/单位	公式	描述
2D	平均斑块面积（AREA_MN）/hm^2	$AREA_MN = \frac{\sum_{j=1}^{n} a_{ij}}{n}$	反映绿色空间规模大小
	斑块密度（PD）/（个·hm^{-2}）	$PD = \frac{\int_{i}^{n} M_i}{n}$	用于衡量景观破碎化程度
	景观形态指数（LSI）	$LSI = \frac{0.25\int_{i}^{n} e_{ji}^{*}}{\sqrt{n}}$	反映景观斑块要素形状；值越大斑块形状越复杂
	聚集度指数（AI）/%	$AI = \left[\frac{g_{ii}}{\max \rightarrow g_{ii}}\right](100)$	考察每一种景观类型斑块间的连通性；取值越小，景观越离散
3D	冠层高度（CH）/m	—	冠层顶端相对地面的高度
	冠层高度标准差（SDCH）	—	反映冠层高度的离散程度
	绿容积率（GVR）	$GVR = \frac{LA}{S} = LAI$	每单位地块面积上的单面叶面积总和[25]

2.2 数据来源及处理

2.2.1 数据来源

本文使用的数据主要是遥感数据集、建筑矢量数据、冠层高度数据、人口数据、GDP 数据（表 3）。

2.2.2 数据处理

1）2D 绿色空间指标提取。基于 ENVI 5.4 对 Gaofen-2 遥感影像进行辐射定标、几何校正和大气校正，获取准确的地表反射率。采用面向对象分类法，结合 NDVI 等指标识别城市绿色空间（图 2）。经检验，分类精度验证达 92.5%，Kappa 系数为 0.95。将矢量数据转换为 1 m 的栅格数据，以控规单元为基本单位，利用 Fragstats4.2 批量计算各单元的景观格局指标。

表 3　数据来源与使用

数据类型	数据来源	数据时间	分辨率	数据用途
遥感数据集	Gaofen-2 遥感影像	2021 年 8 月	0.8 m	计算绿色空间景观格局指标
建筑矢量数据	Open Street Map 矢量数据	2021 年 9 月	—	计算 3D 建筑指标
冠层高度数据	Meta 公司(https://sustainability.fb.com)	2020 年	1 m	计算冠层高度和标准差
人口数据	Worldpop(https://hub.worldpop.org)	2020 年	100 m	计算各单元人口
GDP 数据	国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)	2020 年	1 km	计算各单元 GDP



图 2　研究区域绿色空间提取

2）3D 建筑数据计算。将多源建筑矢量数据统一转换为 ArcGIS Pro 3.3 可识别格式。对缺失数据，结合 Gaofen-2 影像人工描绘建筑轮廓，并通过建筑阴影评估法补充高度属性[26]，所有数据均选用相近年份以保证一致性。

3）社会经济指标计算。人口与 GDP 数据通过克里金插值法重采样至 30 m 分辨率，计算各控规单元的人口密度与 GDP 总量，用以表征社会经济特征。本研究聚焦非气候因素（如城市形态[27]、社会经济[28]）对不同 LCZ 中绿色空间的影响，因此气候因素不作讨论。

2.3　基于 LCZ 的街区形态分类

分别计算控规单元中 3 类建筑高度的建筑地块面积占比与 7 种土地覆盖类型的面积占比，利用这 10 个因素初步确定一个控规单元是否构成单一功能单元或混合功能单元。由于现实中单元类型不能匹配 17 种理想 LCZ 类型，这类单元往往由两类或多类 LCZ 组合而成（图 3）。

2.4　数据分析

首先，在数据处理的基础上，对研究区内各单元进行城市形态划分，并计算绿色空间指标；其次，基于 SPSS 的单因素方差分析和 Sperman 相关性分析，计算 2D/3D 指标在不同 LCZ 类型的差异性与相关性[29-30]，并分别使用 Graphpad prism9、Origin2024 软件作图表达，其中单因素方差分析表明，LSI、AI、CH、SDCH4 项指标符合方差齐性，采用 Bonferroni 进行两两单因素方差分析；AREA_MN、PD、GVR 不符合方差齐性（$P<0.05$），采用 Tammany 进行事后两两分析；最后，借助地理探测器，量化街区建筑环境（建筑密度、建筑平均高度、不透水率）和社会经济因素（人口密度、GDP）影响因素对绿色空间指标的影响解释力[31-32]。

3　结果与分析

3.1　城市形态划分及绿色空间指标

研究区域内，506 个有效控规单元被归类为 55 种 LCZ 类型，包括 11 种单一型、43 种复合型及 1 种综合型（LCZ COMP）。主要的 7 种类型为 LCZ 5（133 个）、LCZ 5_4（70 个）、LCZ COMP（48 个）、LCZ 4_5（40 个）、LCZ 2（32 个）、LCZ 4（21 个）和 LCZ 2_3（14 个），共占总数的 71%（图 4）。

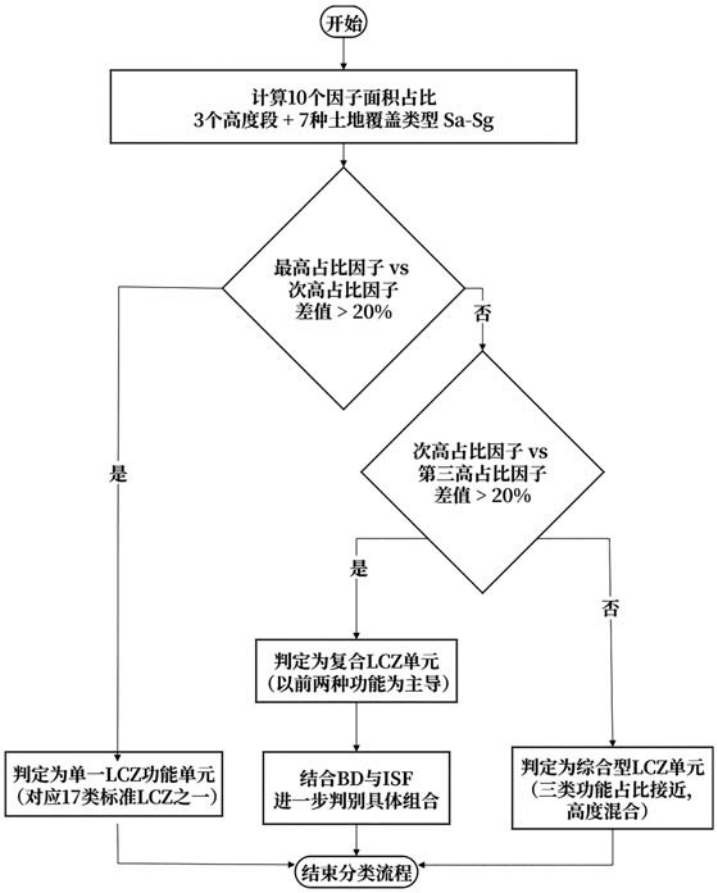


图 3 LCZ 形态分类流程

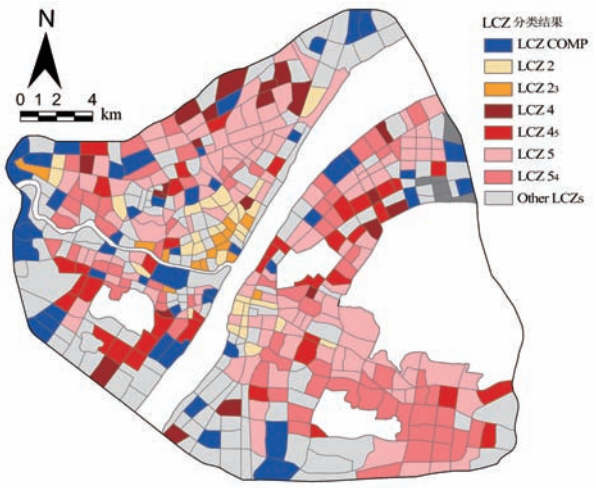


图 4 武汉中心城区 LCZ 分类

对 7 类绿色空间 2D/3D 指标进行 Min-Max 标准化处理并绘制小提琴图（图 5）。2D 指标中，AREA_ MN 普遍较低但范围广，反映大部分 LCZ 类型斑块面积偏小、局部存在大斑块；AI 多集中于高值，显示武汉市绿色空间斑块聚集态势明显；PD 与建筑密度密切相关，LCZ 2 和 LCZ 2_3 的 PD 范围较大，其破碎化程度较高。3D 指标中，CH 和 SDCH 分布集中，在不同 LCZ 类型中反映冠层高度较为一致；GVR 普遍偏低，反映各类 LCZ 中大型绿地零散、小型绿化节点不足。

在 7 类主要 LCZ 中，LCZ 5 和 LCZ 5_4 的绿色空间指标分布特征相对均衡，GVR 较低、SDCH 集中，这可能与低密度区域垂直绿化以及乔木层高度标准化配置有关。

3.2 2D/3D 绿色空间指标差异性及相关性

3.2.1 不同 LCZ 的绿色空间指标差异性

由图 6 可知，2D 指标中，AREA_ MN 和 LSI 组间差异较小，PD 和 AI 差异显著（$P<0.001$），尤其是 LCZ 2 和 LCZ 2_3，可能与建筑密度和绿地分布集中度相关。LCZ 2 和 LCZ 4 在 AREA_ MN 存在差异，可能与建筑密度差异导致的斑块面积不同有关。LSI 方面，LCZ 5 与 LCZ 2_3 差异显著（$P<0.001$），LCZ 5_4 与多类型存在差异，可能源于建筑布局和绿地配置的复杂性。

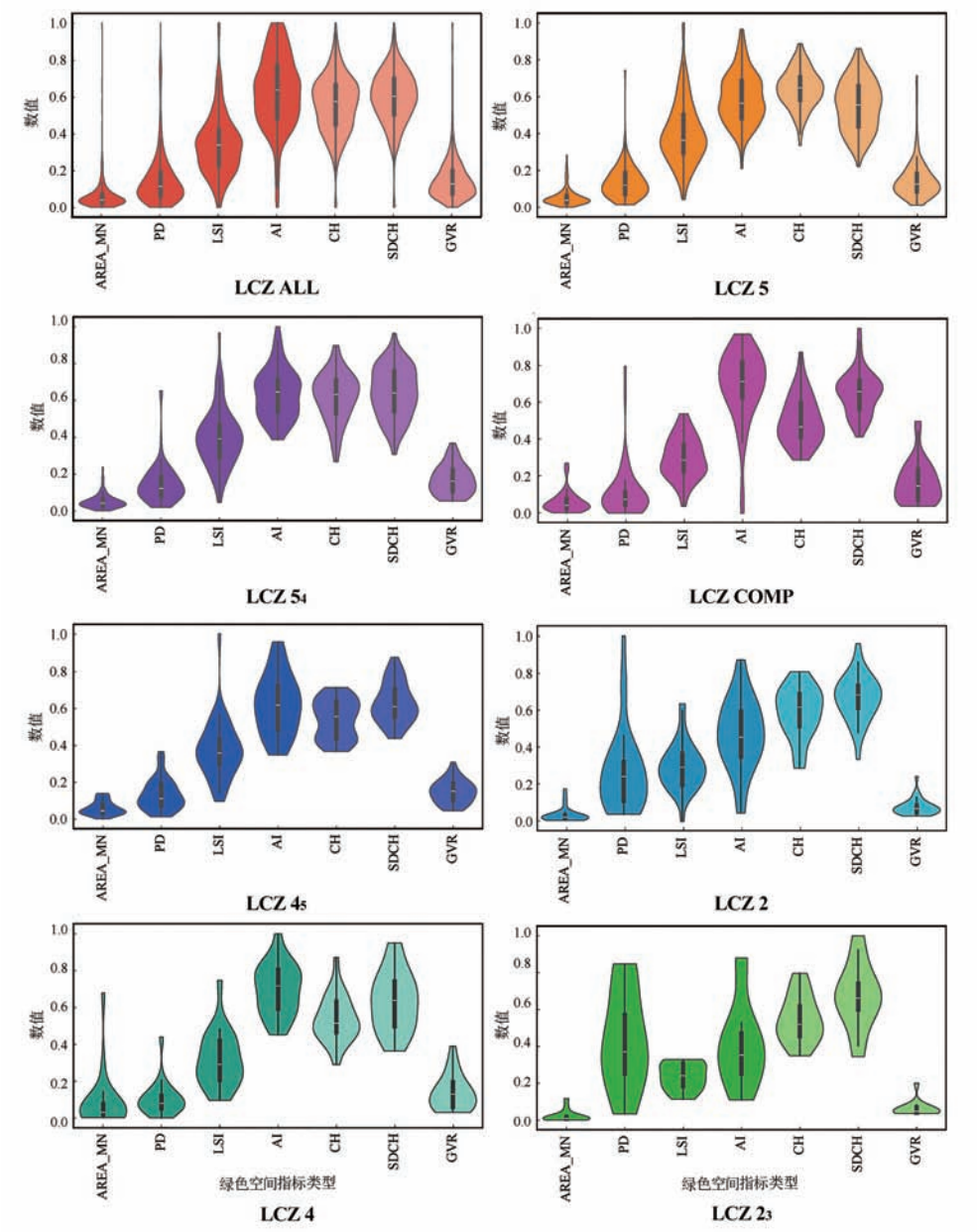


图 5　主要类型 LCZ 绿色空间指标

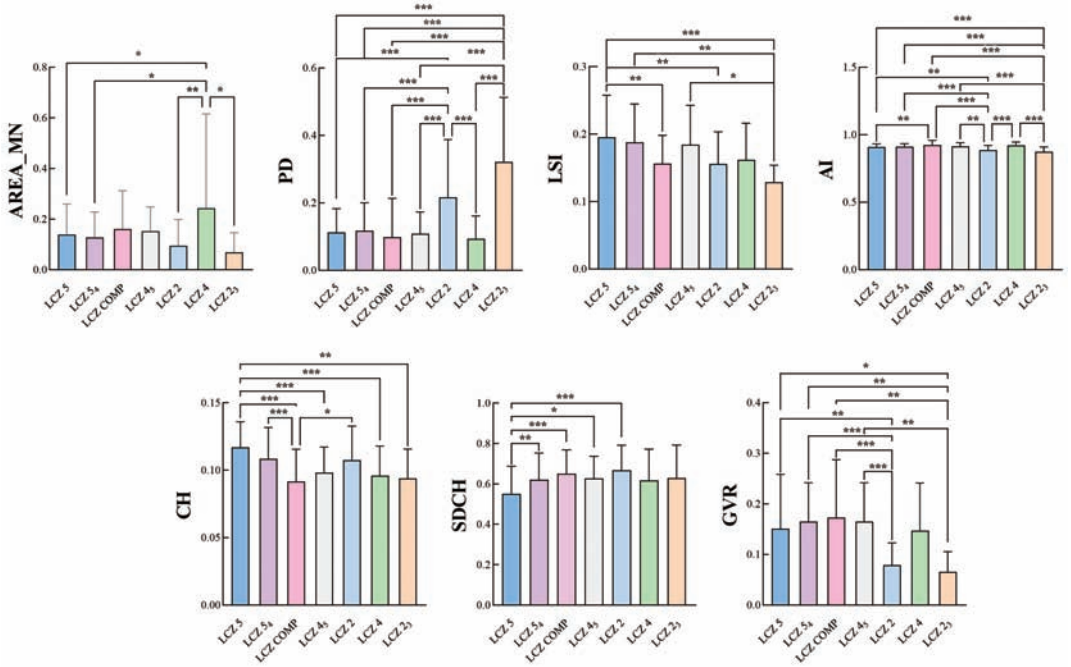
3D 指标中，CH 指标中 LCZ 5 与多数类型存在差异，LCZ 5_4 与 LCZ COMP 差异显著（$P<0.001$），可能受植被类型和高度影响。SDCH 指标显示 LCZ 5 与 LCZ COMP、LCZ 2 差异明显，可能由于 LCZ 5 建筑密度低且植被结构多样化。GVR 指标中，LCZ 2、LCZ 2_3 与其他类型差异显著（$P<0.001$），反映了植被覆盖和建筑密度的综合影响。

3.2.2　不同 LCZ 的绿色空间指标相关性

相关性分析（图 7）表明，LCZ 类型与 AREA_ MN、SDCH、GVR、AH、CH 显著相关。其中，LCZ 5 与 CH、SDCH 显著相关，可能源于低密度区统一绿化标准；LCZ 5_4 与 GVR 显著相关，可能与中层建筑减少对阳光遮挡，利于植被生长有关；LCZ 2 与 AREA_ MN 显著相关，反映出高建筑密度导致斑块面积小；LCZ 4 与 LSI 显著相关，可能与高层建筑阴影抑制植被有关。

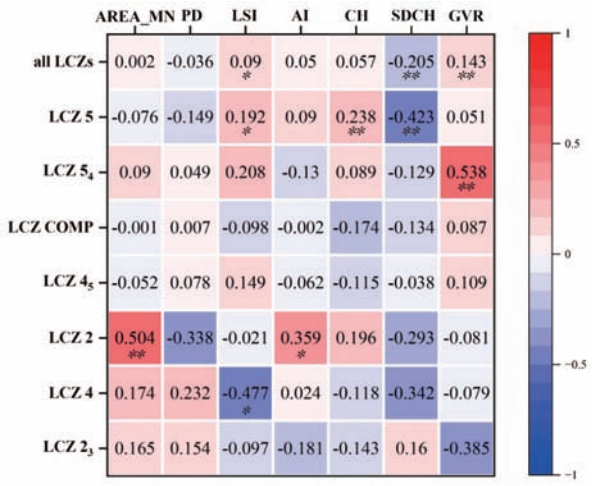
3.3　影响因素

使用地理探测器因子探测结果（表 4）显示，BD 和 ISF 对 LCZ 划分的解释力较强且显著（P 趋近 0），可能是因为它们直接反映建成环境特征。而 ABH 和 GDP 解释力弱且不显著，可能是因为



注：*** 表示有显著差异，P<0.001；** 表示有差异，P<0.01；* 表示有微弱差异，P<0.05。

图 6 不同 LCZ 类型的绿色空间指标差异性



注：*、** 分别表示在 0.05 与 0.01 水平上显著相关。

图 7 不同类型 LCZ 与绿色空间指标相关性

表 4 GeoDetector 因子探测

项目	BD	ABH	ISF	PD	GDP
q statistic	0.109 93	0.027 231	0.056 162	0.087 866	0.019 46
P value	0.000	0.187 277	0.004 494	0.000	0.436 242

建筑高度区域差异大、GDP 作为静态值无法反映动态影响。

图 8 显示，所有两因子组合均呈现非线性增强效果。其中，ISF 与 GDP 的交互作用显著，可能与经济发达区域通常伴随高不透水率特征有关；

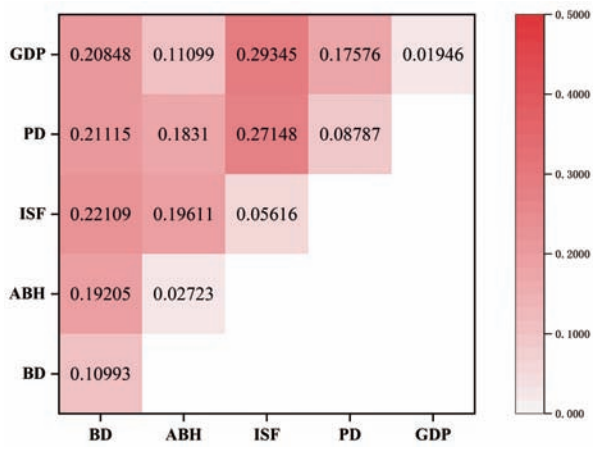


图 8 交互探测

ISF 与 PD 的强交互作用可能源于高不透水率区域通常与高人口密度区域重叠，通过与人类活动协同加剧 LCZ 分异。

综上，建成环境类因素是武汉主城区 LCZ 分异的主要驱动力，社会经济因素作用较弱，可能与数据时效性或空间尺度有关。影响因素间普遍存在非线性增强效应，说明 LCZ 形成是多重因素协同作用的结果。因此，在城市规划中需重点关注高建筑密度、不透水地表与人口密集区的叠加效应，并采用动态社会经济数据提升模型解释力。

4　讨论

4.1　基于多维指标的绿色空间评价体系创新

本研究通过构建 2D 和 3D 绿色空间指标体系，分析了武汉市主城区不同 LCZ 下绿色空间指标差异性、相关性及其影响因素。主要贡献在于 3 方面：其一，突破传统二维指标框架，整合 GVR、CH 等绿色空间三维参数，构建了“平面-立体”双维评价体系，弥补了垂直维度表征不足。例如，GVR 量化单位面积绿量生态效益，弥补了 NDVI 仅反映平面覆盖的不足[24]。其二，将 LCZ 与控规单元结合，解决了行政边界或规则网格难以捕捉街区形态异质性的问题。通过识别单一型、复合型和综合型单元，揭示混合功能街区中绿地与建筑的动态平衡机制。其三，通过单因素方差分析和地理探测器，明确了不同 LCZ 类型对绿色空间指标的影响，证实了建成环境指标对绿色空间的主导作用（q 值显著）。

然而，受限于横截面数据与 LCZ 分类框架的离散特性，本研究仅能揭示建成环境与绿色空间的相关性强度，不能如网格化研究那样推断具体调控阈值[33]。本研究仍揭示了：1）建成环境对绿色空间的明确因果机制，如高密度街区（如 LCZ 2）的低 GVR 印证了“建筑密集导致绿量压缩”的规律。2）在城市高质量发展背景下，通过“见缝插绿”等创新手段，可突破空间约束提升立体绿化。这为城市规划和绿色空间管理提供了定量依据，支持适应性规划策略。综合来看，2D/3D 指标体系能更全面评估绿色空间特征。未来需开展多时相、多尺度研究，以支撑绿色低碳城市的科学和可持续建设。

4.2　城市街区绿色空间设计优化策略

1）对 LCZ 5、LCZ5_4 等开敞混合区（图 9），需划定大型生态斑块为“不可开发区域”，限制不透水地表扩张；而在商住混合区，建议推广“绿地+公共服务”模式优化绿色空间。

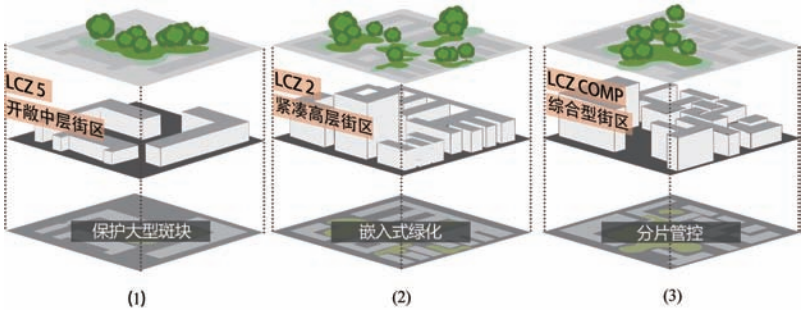


图 9　绿色空间优化策略示意图

2）针对 LCZ 2、LCZ 2_3 等高密度建成区，推行“嵌入式绿化”，即在建筑群中嵌入小型绿地或口袋公园，高层建筑优先采用屋顶绿化等立体增绿措施，中低层建筑鼓励地面与立面绿化结合。

3）针对“高 BD+高 ISF”叠加区域（即综合型街区，如商业中心等），建立生态补偿机制，例如，要求新建项目的不透水表面每增加 1%，需配套增加 0.5%的立体绿化或生态设施等，助力我国“双碳”目标在城市建成区的落地和实施。

5　结论

1）LCZ 有效表征形态差异，绿色空间指标存在显著差异。高密度建成区（如 LCZ 2，LCZ 2_3）表现为高 PD 与低 GVR，反映绿色空间破碎化与集中化并存；低密度区（如 LCZ 5，LCZ 5_4）则在 LSI 和 CH 上表现更优。

2）LCZ 类型与绿色空间指标显著相关。LCZ 5_4 因绿地与中层建筑的垂直协同提升叶面积密度，与 GVR 相关性最强；LCZ 4 因大面积建筑阴影抑制植被，与 LSI 相关性更高。这有力揭示了城市形态与生态的内在联系。

3）建成环境是核心驱动力，规划需侧重物质空间调控。建筑密度、不透水面等建成环境因素是绿色空间差异的主因，社会经济因素作用有限。这表明当前绿色空间优化更需关注物质空间设计（如密度、布局），而非单纯经济投入。

参考文献

[1] LIU H L, CHEN W X, SUN S Q, et al. Revisiting China's urban transition from the perspective ofurbanisation: a critical review and analysis[J]. Sustainability, 2024, 16(10): 4122.

[2] MIAO Y B, LIU J J, WANG R Y. Occupation of cultivated land for urban-rural expansion in China: evidence from national land survey 1996-2006[J]. Land, 2021, 10(12): 1378.

[3] 刘畅, 张晓瑞. 城市绿色空间研究进展与展望[J]. 河北地质大学学报, 2024, 47(1): 92-98.

[4] 李诗尧, 李翅. 南太行城镇群绿色空间时空演变与驱动因素分析[J]. 中国城市林业, 2024, 22(6): 108-115.

[5] 陈明, 李若雯. 县域绿色空间景观格局对碳汇的影响: 以长三角为例[J]. 中国园林, 2024, 40(8): 111-117.

[6] 高宇, 木皓可, 张云路, 等. 基于 MSPA 分析方法的市域尺度绿色网络体系构建路径优化研究: 以招远市为例[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7547-7556.

[7] XU X C, OU J P, LIU P H, et al. Investigating the impacts of three-dimensional spatial structures on CO_2 emissions at the urban scale[J]. Science of the Total Environment, 2021, 762: 143096.

[8] YUAN B, ZHOU L, HU F N, et al. Effects of 2D/3D urban morphology on land surface temperature: contribution, response, and interaction[J]. Urban Climate, 2024, 53: 101791.

[9] 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.

[10] CLIFTON K, EWING R, KNAAP G J, et al. Quantitative analysis of urban form: a multidisciplinary review [J]. Journal of Urbanism: International Research on Place making and Urban Sustainability, 2008, 1(1): 17-45.

[11] STEWART I D, OKE T R. Local climate zones for urban temperature studies[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(12): 1879-1900.

[12] 张云伟, 顾兆林, 周典. 城市局部气候分区及其参数化条件下风环境模拟[J]. 地球环境学报, 2016, 7(5): 480-486, 493.

[13] 向易睿, 张宇峰, 石玉蓉. 空间形态高度异质性城市 LCZ 地图制作方法研究[J]. 建筑科学, 2020, 36(4): 62-69, 113.

[14] LIN Y, AN X, YUAN J C, et al. The impact of the urban landscape on $PM_{2.5}$ from LCZ perspective: a case study of Shenyang[J]. Urban Climate, 2024, 57: 102107.

[15] 陈明, 戴菲, 李文佩, 等. 基于绿视率的城市绿化评估: 以武汉江汉区为例[J]. 中国城市林业, 2019, 17(3): 1-6.

[16] 戴菲, 陈明, 朱晟伟, 等. 街区尺度不同绿化覆盖率对 PM_{10}、$PM_{2.5}$的消减研究: 以武汉主城区为例[J]. 中国园林, 2018, 34(3): 105-110.

[17] 岳文泽, 刘学. 基于城市控制性详细规划的热岛效应评价[J]. 应用生态学报, 2016, 27(11): 3631-3640.

[18] DENG H J, ZHANG S R, CHEN M H, et al. Sensitivity of local climate zones and urban functional zones to multi-scenario surface urban heat islands[J]. Remote Sensing, 2024, 16(16): 3048.

[19] CHEN M, REN Z Y, BI S B. Impact of green space patterns on $PM_{2.5}$ levels: a local climate zone perspective [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 478: 143975.

[20] 王朋冲, 于强, 裴燕如, 等. 翁牛特旗景观格局尺度效应分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 223-231, 181.

[21] 梁加乐, 陈万旭, 李江风, 等. 黄河流域景观破碎化时空特征及其成因探测[J]. 生态学报, 2022, 42(5): 1993-2009.

[22] 胡凯龙, 刘清旺, 崔希民, 等. 多源遥感数据支持下的区域性森林冠层高度估测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(2): 289-296, 303.

[23] ALBUQUERQUE R W, MATSUMOTO M H, CALMON M, et al. A protocol for canopy cover monitoring on forest restoration projects using low-cost drones[J]. Open Geosciences, 2022, 14(1): 921-929.

[24] 王文礼, 杨星. 绿色容积率: 建筑和城市规划的一种生态量度[J]. 中国园林, 2006, 22(9): 82-87.

[25] 姚崇怀, 李德玺. 绿容积率及其确定机制[J]. 中国园林, 2015, 31(9): 5-11.

[26] WU B, HUANG H L, ZHAO Y. Utilizingbuilding offset and shadow to retrieve urban building heights with ICESat-2 photons [J]. Remote Sensing, 2023, 15(15): 3786.

[27] YANG C J, LI R R, SHA Z Y. Exploring the dynamics of urban greenness space and their driving factors using geographically weighted regression: a case study in Wuhan metropolis, China[J]. Land, 2020, 9(12): 500.

[28] FAN X Y, GAO P, TIAN B Q, et al. Spatio-temporal patterns of NDVI and its influencing factors based on the ESTARFM in the Loess Plateau of China [J]. Remote Sensing, 2023, 15(10): 2553.

[29] 张丽霞, 张峰, 上官铁梁. 芦芽山植物群落种间关系的研究[J]. 西北植物学报, 2001, 21(6): 37-43.

[30] 林金清, 肖春妹, 谭平华, 等. 应用 Origin 软件估算非线性方程的模型参数[J]. 计算机与应用化学, 2006, 23(3): 271-274.

[31] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.

[32] 刘衡, 朱铁辉, 辛岭. 农业现代化与城乡融合的耦合协调和驱动因素[J]. 农业现代化研究, 2021, 42(6): 982-995.

[33] 陈明. 基于 $PM_{2.5}$ 分析的城市街区建成环境研究: 长江中下游地区特大城市的实证[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.