# 武汉建成区绿地三维绿量公平性评价*

王 港[1] 李纪钰[1] 周孜璇[1] 张 炜[1,2]

1 华中农业大学园艺林学学院 武汉 430070
2 农业农村部华中地区都市农业重点实验室 武汉 430070

**摘要**：【目的】为探究表征垂直维度城市绿地的空间异质性特征，对区域内三维绿量进行公平性分析和评估，从而为城市绿地的空间规划及布局优化提供指导。【方法】基于三维绿量相关计算结果，引入基尼系数、洛伦兹曲线与区位熵量化分析，构建基于三维绿量的城市绿地公平性的计算方法，并以武汉市建成区绿地为例，评价其绿地的空间分布及其公平性特征。【结果】1）在武汉市建成区范围内，汉南区和青山区三维绿量资源分配公平程度最高，洪山区公平程度最低。2）武汉市建成区范围内人口-三维绿量分布匹配程度较差，且呈现由中心向四周逐渐递增的空间分布格局。3）人口-三维绿量分布匹配程度较高的区域多集中在生态环境较为良好、自然景观较为丰富的城市公园和风景游憩绿地，匹配度较低区域多集中在建成区中心的老旧居住区。【结论】武汉市建成区整体和各辖区的三维绿量公平性分布均表现显著差异。相较传统二维绿量指标，基于三维绿量的公平性评估能更揭示城市绿地资源分布的结构性矛盾，并为优化城市绿地空间规划和提升生态服务功能公平性提供量化参考依据。

**关键词**：三维绿量；基尼系数；绿地公平性评价；景观格局
DOI：10.12169/zgcsly.2025.02.24.0001

## Evaluation of Three-dimensional Green Quantity Equity in Wuhan's Built-up Area

Wang Gang[1] Li Jiyu[1] Zhou Zixuan[1] Zhang Wei[1,2]

(1. College of Horticulture and Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Agriculture and Rural Development for Urban Agriculture in Central China, Wuhan 430070, China)

**Abstract**: 【Objective】 In order to accurately characterize the spatial heterogeneity characteristics of vegetation communities in vertical dimension, the study conducts the analysis and evaluation of 3D green quantity equity to provide guidance for the spatial planning and layout optimization of green spaces in Wuhan City. 【Method】 A calculation method of urban green space equity is proposed based on 3D green quantity analysis. This paper takes Wuhan's built-up areas to quantitatively analyze the results of 3D green quantity related calculation with Gini coefficient, Lorenz curve and location entropy, which is used to evaluate the spatial distribution characteristics and their equity of vegetation communities. 【Result】 1) Within the built-up areas, Hannan District and Qingshan District have the highest equity in terms of the distribution of 3D green quantity resources, while Hongshan District has the lowest equity; 2) The matching degree of population-3D green quantity distribution in the built-up areas is low, and the spatial

收稿日期：2025-02-24
* 基金项目：华中农业大学自主科技创新基金项目（2662025PY027）
第一作者：王港（1997-），男，硕士，研究方向为城市绿色基础设施规划设计。E-mail：UESResearchLab@gmail.com
通信作者：张炜（1988-），男，博士，副教授，研究方向为数字风景园林和参数化设计。E-mail：zhang28163@mail.hzau.edu.cn

distribution tends to gradually increase from the center to the periphery; and 3) The areas with better matching degree of population-3D green quantity distribution are mostly concentrated in urban parks and scenic/recreational green spaces with better ecological environment and a higher proportion of natural landscape, while the poor areas are mostly concentrated in the old residential areas in the center of the built-up areas.【Conclusion】 Significant disparities exist in the equitable distribution of 3DGV across Wuhan's built-up area and among its administrative districts. Compared with conventional 2D green space indicators, equity assessments based on 3DGV indicators could more effectively reveal the structural imbalances in the allocation of urban green space resources. These findings could provide a robust quantitative reference for the optimization of urban green space planning and promoting a more equitable distribution of ecological services.

**Keywords**: three-dimensional green volume; Gini coefficient; evaluation of green space equity; landscape pattern

城市化的发展导致了一系列环境问题，城市绿地存在资源分配不均，居民绿地空间不公平等问题。国务院于 2014 年《国家新型城镇化规划》文件中提出以人为本，弱化不同区域间群体的固有差距的理念。城市绿地作为城市的重要基础设施，在生态、游憩、教育、健康、防护、美化等方面都发挥着重要作用[1-2]。近年来，绿地的公平性成为城市规划中重要的社会公平议题。绿地的公平性指城市居民在获取绿地资源和服务时的平等性，包括绿地的数量、质量、可达性和分布的均衡性[3-4]。公平性不仅关注绿地的物理存在，还涉及绿地对不同社会群体的可及性和使用效率[5-6]。早期对于绿地空间公平性的研究主要利用统计学方法测度或者二维指标量化绿地的二维空间分布，如 Xu 等[7]通过计算人均公园面积评估绿地的供给是否充足。Nero[8]利用基尼系数分析加纳库马西城市绿地时空演变和公平性。Kabish 和 Haase[9]通过洛伦兹曲线定量评估城市绿地分配的公平性，揭示不同社区间的供给差异。王梁飞和郭晓华[10]通过 GIS 网络分析，使用洛伦兹曲线和区位熵评估不同生活圈武汉江汉区城市绿地服务范围及空间正义。这些测算和评价仅从二维空间角度对公园可达性、数量均衡性进行考量。城市高层建筑区和垂直绿地（如屋顶花园、立体绿化等）建设，改善了绿地资源的空间分布[11]。研究表明，在二维绿量相似的情况下，植物在垂直结构上的差异会带来截然不同的生态效益。因此，学者们开始从二维空间转换为三维绿量对城市绿地公平性进行分析和评估。

当前城市绿地三维绿量研究主要集中在三维绿量的量化评估、微气候模拟以及城市生态效益的影响分析等方面。常用的三维绿量计算方法包含 3 种：第一种是对植被直接测量并进行反演，如周坚华和孙天纵[12]通过测算植被枝干和茎叶的空间体积计算三维绿量；第二种是根据二维平面进行立体绿量模拟得到三维绿量值，如陈自新等[13]通过计算植被的叶面积密度等指标来测算三维绿量；第三种是通过激光雷达扫描获取植被模型进行三维绿量测算，如 Simon 等[14]利用所选指标构建复合模型测算三维绿量。三维绿量可以基于遥感影像、点云数据、无人机测量以及三维重建技术等获取的数据进行测算。在绿地的公平性研究方面，韩贵锋和卢雨蓉[15]进行了基于三维空间的视觉可达性研究，以提升城市公园布局的公平性。周聪惠和宗媛[16]基于机器学习算法，对绿地的三维绿量可达公平性进行了研究。但总体来说，现有研究只局限在可达性方面，缺少基于三维绿量在宏观尺度上对城市绿地公平性的评估和优化研究。

为探讨城市尺度下基于三维绿量的绿地公平性评估方法，本研究以武汉市建成区范围为例，通过植被冠层高度数据计算绿地的三维绿量，并依据对应的三维绿量和人口的空间分布计算相应的基尼系数、洛伦兹曲线和区位熵，以进行公平性评估，为武汉市绿地空间规划及布局优化提供指导。

## 1　研究区概况

武汉市位于我国中部地区，为亚热带季风气候，全年热量和水分条件充足，具有良好的植被基底，为城市绿地形成较高的垂直结构与三维绿

量潜力提供了自然基础。同时城市空间结构复杂、人口密度高，绿地资源承载着显著的生态调节与公共健康服务功能[17-18]。本研究以武汉市建成区绿地为研究对象，该区域集中了城市居住、商业、公共服务及交通功能，是居民日常活动最为频繁、绿地生态和文化服务需求最为集中的区域。建成区内绿地类型多样，植被结构丰富，但随着城市快速扩张与高强度土地开发，区域内绿地空间呈现出数量差异与结构不均衡特征，进而影响居民获得生态服务的公平性[19-20]。

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源与处理

本研究使用的基础数据包括武汉市建成区城市建筑、人口、行政边界、公园、植被冠层高度和土地利用类型数据。在 ArcGIS Pro 中，依据土地利用类型数据，生成武汉市建成区范围。植被冠层高度数据为 ETH Global Canopy Height 2020 基于 2020 年 Sentinel-2 高分辨率的多光谱影像，精度为 10 m[21]，建成区内植被冠层高度范围为 0~41 m。建筑数据来自网络爬取的高德建筑矢量数据，包含建筑层数分布情况。行政边界数据使用中国科学院资源环境数据中心平台发布的武汉市域矢量数据和武汉市区县边界矢量数据[22]。建成区内人口数量分布数据来自 WorldPop，数据类型为栅格数据，分辨率为 100 m[23]。

### 2.2 三维绿量指标计算

植物三维绿量的计算可简化为计算植被枝干和茎叶几何体的空间体积[24]，或根据叶面积指数（LAI）值间接计算[25-26]。本研究采取空间体积计算方法，将单位面积内的树冠形状抽象为长方体，其对应长宽为单位面积的像元长宽，高度为单位面积内的植被冠层平均高度，以此估算植被体积以计算三维绿量（图 1）。




**图 1 基于植被体积的武汉建成区绿地三维绿量可视化**

根据城市绿地相关二维绿量指标的计算方法，本研究提出了对应的三维绿量评价指标，包含总三维绿量、人均三维绿量、人均公园绿地三维绿量、单位面积三维绿量（表 1）。

**表 1 三维绿量评价指标**

| 指标 | 计算方法 | 说明 |
|---|---|---|
| 三维绿量/$m^3$ | $V_{GV}=\sum_{i=1}^{n}LVV_i$ | $LVV$ 为单位像元三维绿量 |
| 人均三维绿量/$m^3$ | $V_{Gm}=\frac{V_G}{N_p}$ | $N_p$ 为人口总和；$V_G$ 为城市建成区绿地体积和 |
| 人均公园绿地三维绿量/$m^3$ | $\lambda_{G1}=\frac{V_{G1}}{N_P}$ | $V_{G1}$ 为城市中公园绿地体积和 |
| 单位面积三维绿量/（$m^3\cdot m^{-2}$） | $\lambda_u=\frac{V_{GV}}{V_c}$ | $V_c$ 为城市中所有用地面积和 |

在 ArcGIS Pro 中构建 1 000 m×1 000 m 的渔网网格，将研究范围与网格进行叠加。以网格为单位进行指标计算，并在等面积的基础上进行分析。

### 2.3　基于三维绿量的绿地公平性指标计算

#### 2.3.1　基尼系数和洛伦兹曲线的公平性分析

洛伦兹曲线（Lorenz curve）是用来衡量数据分布不平等程度的图形，直观反映资源是否分平等。20 世纪初意大利统计与社会学家 Corrado Gini 基于洛伦兹曲线提出了基尼系数的概念，以进行更便捷的分析（图 2）[27]。

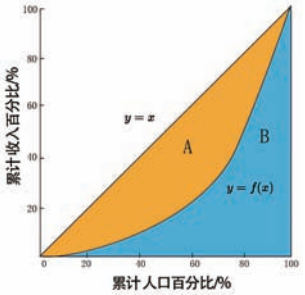



图 2　洛伦兹曲线

洛伦兹曲线的弯曲程度反映了资源分配的公平性并呈负相关关系，曲线弯曲程度越大表明该区域内的公平程度越低，反之则说明公平程度越高。而基尼系数的计算结果值和公平性呈正相关关系，越小表明公平性越低，值越大则公平性越高[28]。计算公式如下：

$$G = 1 - \sum_{i=1}^{n} (P_i - P_{i-1})(S_i + S_{i-1}) \qquad (1)$$

式（1）中：$G$ 表示基尼系数，值域［0，1］（表 2）；i 表示第 i 渔网，值域［1，$n$］；$P_i$ 表示第 $i$ 渔网人口变量的累积比例，值域［0，1］；$S_i$ 表示第 $i$ 个渔网三维绿量体积变量累积比例，值域［0，1］，基于基尼系数计算结果可进一步进行空间资源分配程度等级的划分（表 2）。

表 2　国际通用基尼系数取值范围

| 级别 | 取值范围 | 空间资源分配程度 |
|---|---|---|
| Ⅰ | G>0.5 | 差距悬殊 |
| Ⅱ | 0.4≤G<0.5 | 差距较大 |
| Ⅲ | 0.3≤G<0.4 | 相对合理 |
| Ⅳ | 0.2≤G<0.3 | 比较平均 |
| Ⅴ | G<0.2 | 绝对平均 |

#### 2.3.2　区位熵的公平性分析

区位熵可衡量区域要素的空间分布情况[29]，可用于评估绿地空间布局的公平性，反映局部三维绿量供需情况相对于整体范围的分布情况和空间分布特征[30]。本研究中区位熵计算公式如下：

$$Q_i = \frac{q_i/p_i}{q/p} \qquad (2)$$

式（2）中：$Q_i$ 表示 $i$ 单位网格内三维绿量区位熵（表 3）；$q_i$ 表示 $i$ 渔网区域的三维绿量值；$p_i$ 表示 $i$ 渔网区人口数；$q$ 表示建成区三维绿量总值；$p$ 表示建成区的人口总数。

表 3　区位熵等级分布

| 级别 | 取值范围 | 三维绿量供需水平 |
|---|---|---|
| Ⅰ | $Q_i$>1 | 较高 |
| Ⅱ | $Q_i$≤1 | 较低 |

基于区位熵计算结果，生成人口-三维绿量空间匹配情况，并分别从建成区整体和区域尺度对三维绿量进行空间分析。

## 3　结果与分析

### 3.1　不同三维绿量指标计算

计算统计武汉市建成区范围内各辖区绿地三维绿量分布，其中总三维绿量最大的为江夏区，最小的为江汉区。在人均三维绿量方面，最大的为蔡甸区，最小的为江汉区，且有 5 个辖区的人均绿量高于整体水平。在人均公园绿地三维绿量方面，最大的为东西湖区，最小的为蔡甸区。在单位面积三维绿量方面，最大的为武昌区，最小的为汉南区，且有 7 个辖区高于整体水平（表 4）。

### 3.2　三维绿量总体公平性

计算得出建成区总体三维绿量基尼系数为 0.68，数值大于 0.5，位于第Ⅰ级别。且洛伦兹曲线弯曲变化较为明显，呈现出明显的非线性分布特征，同时随着人口累计比例的增加，其曲率持续增大。在人口累计比例处于较低区间时，三维绿量的累积占比增长较为缓慢。当人口累计达到 10%时，其对应的三维绿量占比仅为 0.1%；人口累计至 20%、30%和 40%时，三维绿量占比分别为 2%、5%和 9%，整体处于低位水平。随着人口累计比例进一步增加，三维绿量的累积速率逐渐提升，在相同的人口增量条件下，绿量资源的增加幅度明显扩大。在人口累计后续区间内，

表 4 武汉市建成区绿地三维绿量分布

| 计算区域 | 总三维绿量/$m^3$ | 人均三维绿量/$m^3$ | 人均公园绿地三维绿量/$m^3$ | 单位面积三维绿量/$m^3$ |
|---|---|---|---|---|
| 研究范围 | 777 036.25 万 | 569.30 | 54.72 | 9.12 |
| 江夏区 | 144 500.54 万 | 1 369.67 | 55.23 | 8.48 |
| 洪山区 | 142 651.87 万 | 814.22 | 30.56 | 9.80 |
| 蔡甸区 | 112 263.46 万 | 1 826.61 | 1.18 | 8.34 |
| 黄陂区 | 101 151.35 万 | 821.70 | 20.88 | 8.57 |
| 东西湖区 | 87 290.39 万 | 951.91 | 128.22 | 9.49 |
| 汉阳区 | 47 856.43 万 | 531.74 | 4.67 | 9.02 |
| 新洲区 | 44 758.28 万 | 460.05 | 22.34 | 8.97 |
| 江岸区 | 26 612.97 万 | 253.22 | 116.80 | 11.57 |
| 武昌区 | 20 461.27 万 | 161.11 | 73.78 | 12.78 |
| 青山区 | 15 926.44 万 | 310.46 | 72.39 | 11.64 |
| 硚口区 | 14 564.01 万 | 194.19 | 76.91 | 10.53 |
| 汉南区 | 10 023.29 万 | 208.26 | 73.82 | 7.02 |
| 江汉区 | 8 975.95 万 | 130.28 | 59.60 | 12.04 |

对应 60%、70%、80% 和 90% 的人口累计占比，其累计三维绿量占比分别达到 13%、20%、28% 和 48%，呈现出显著的差异累积特征。

从曲线两端在相同人口比例节点上的对比可以看出三维绿量分配差异不断放大。在 10%、20%和 40%的人口累计节点处，后段人口对应的三维绿量占比分别约为前段的 13 倍、4 倍和 5.3 倍。累计分布特征表明武汉市建成区三维绿量资源呈现出持续强化的集中趋势，人口与三维绿量之间的累积分配关系呈现出明显的不平衡状态（图 3）。

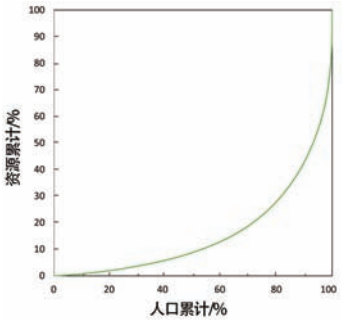



图 3 武汉市建成区三维绿量的洛伦兹曲线

### 3.3 不同市辖区三维绿量公平性

在武汉市 13 个市辖区的三维绿量公平性评价结果中，各区基尼系数呈现出显著差异。三维绿量基尼系数高于 0.50 的区域有 9 个，三维绿量资源分配差距较大和比较平均的辖区数量占比为 15.38%。仅有青山区和汉南区的三维绿量基尼系数为 0.30 和 0.21，范围在 0.2~0.3 区间，处于Ⅳ级别，属于三维绿量资源分配相对均衡的范围。三维绿量资源分配水平差距悬殊的区域占比高达 69.23%，其中，汉南区的三维绿量基尼系数为建成区范围内最低，表明其三维绿量分配公平性最高。相较之下，部分市辖区的三维绿量分配不均衡现象较为突出。洪山区和黄陂区的三维绿量基尼系数最大，均达到 0.65，处于资源分配差距悬殊的区间，是公平性水平最低的区域（图 4）。

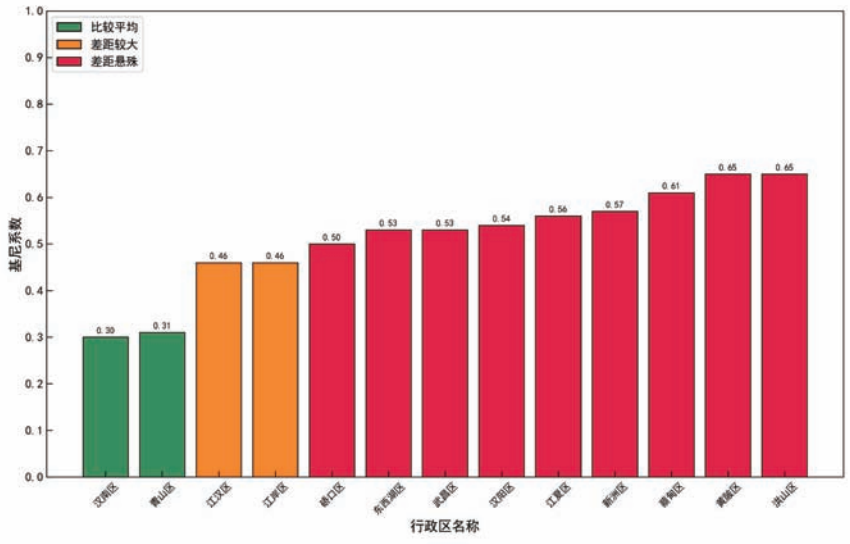



图 4 武汉市各辖区公平性等级

将分析结果进行可视化，生成各辖区的洛伦兹曲线图（图 5）。其各条曲线都具有明显弯曲且曲率差距较为明显，反映各辖区的绿地资源分配差距较大，验证了基尼系数的计算结果。其中，洪山区的三维绿量资源分配是整个武汉市建成区范围内公平性最低的区域。

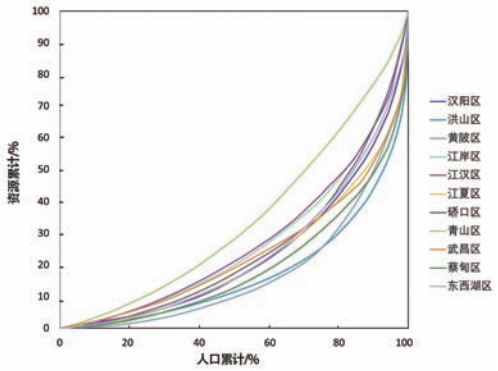



图 5　武汉市建成区各辖区三维绿量的洛伦兹曲线

## 3.4　三维绿量的区位熵

对建成区范围内三维绿量区位熵的计算结果进行可视化，分析三维绿量资源分布与人口之间的空间匹配程度。结果显示，武汉市建成区范围内三维绿量的区位熵具有明显空间分布差异，且整体呈现由边缘至中心递减的空间分布特征。区位熵高值聚集于蔡甸区、黄陂区、洪山区、江夏区等建成区外围边缘区域，低值聚集于江汉区、江岸区、青山区等建成区中部区域（图 6）。

经统计，武汉市建成区范围内人口-三维绿量供需水平较高的区域约占 60%，主要分布在建成区的外缘地段、西北部和西南部，总体呈区块状分布。其中，熵值最高的是张公山寨景区，其他高熵值区域集中在公园、湖泊等生态环境较为良好的区域。而建成区范围内人口-三维绿量供需水平较低的区域约占 40%，集中分布于中心区域。总体而言，武汉市建成区不同区域三维绿量的区位熵值相差较大，说明人口-三维绿量空间分布不匹配，公平性等级较低。

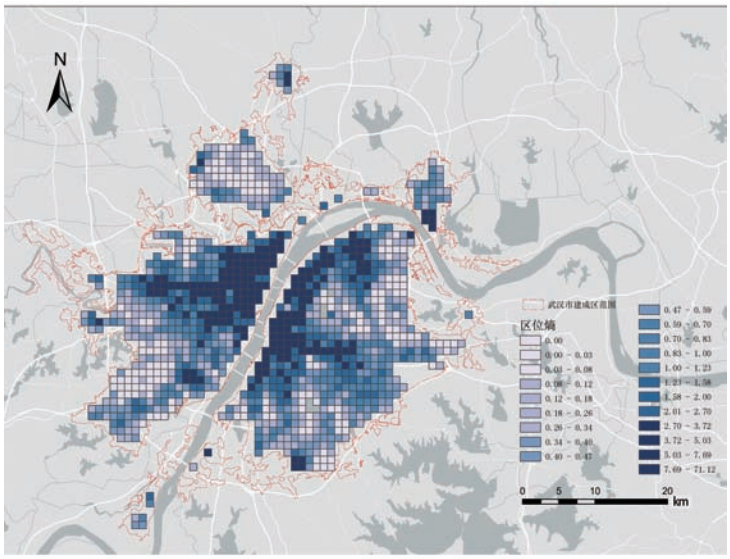



图 6　武汉市建成区区位熵空间分布

基于自然段点法对区位熵进行分级，分析武汉市建成区范围内的区位熵情况（表 5）。当区位熵小于等于 0.97 时定义为低等级，区位熵在 0.97~2.13 时定义为中等级，区位熵大于 2.13 时定义为高等级。根据人口占比情况，低等级区域人口占比最大，高等级占比最小。从面积占比情况看，高等级占比最大，低等级与高等级占比接近，中等级最小。总体而言，武汉市建成区范围内的三维绿量供需匹配水平较不均衡，只有 9.89%的人可以获得较好的绿地资源。

表 5　武汉市建成区人口-面积-区位熵等级

| 等级 | 区位熵 | 人口占比/% | 面积占比/% |
|---|---|---|---|
| 低 | ≤0.97 | 76.28 | 39.00 |
| 中 | 0.97~2.13 | 13.83 | 20.30 |
| 高 | ≥2.13 | 9.89 | 40.69 |

统计各辖区内的区位熵并分析各辖区等级分布发现，各辖区区位熵等级相差较大。其中，低

等级区域占比较低，且在汉南区中仅有中低两个等级分布。除汉南区和青山区以中低等级分布为主以外，其他 11 个辖区都以高等级为主，其中高等级区位熵占比最高的区域为蔡甸区（图 7）。

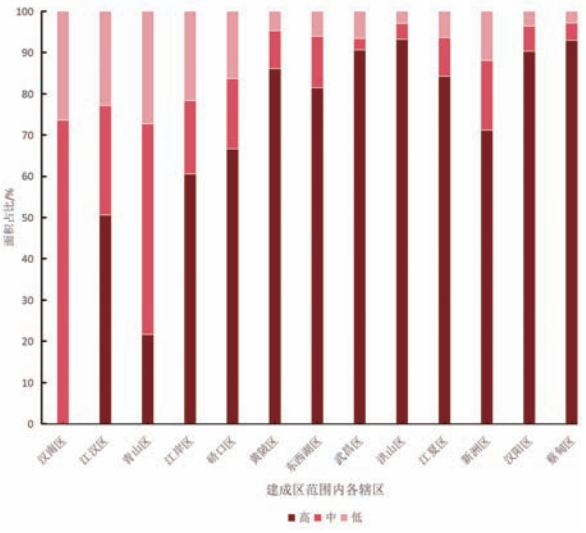



**图 7　建成区范围内各辖区不同等级分布占比**

结合各区域不同用地类型的区位熵分布显示，生态环境较为良好、自然景观较为集中的城市公园和风景游憩绿地的区位熵多为高等级。区位熵等级较低区域则主要集中在景观较为单一的商业区、居住区、交通设施用地和工业区等。

## 4　讨论

城市绿地公平性在城市规划中具有重要意义。传统绿地公平性研究主要基于绿地面积指标，缺乏基于三维空间的绿量特征表达。本研究通过绿地的空间体积计算和评估武汉市建成区绿地的三维绿量公平性。结果发现，影响建成区三维绿量公平性的主要因素包含两个方面：一是自然环境差异导致三维绿量供给不均。二维绿地斑块的分布不均加剧了三维绿量的分布失衡。二是用地性质影响三维绿绿量公平性差异。建成区中心区域土地性质多为居住商业区，人口密集，绿地空间有限且绿化结构单一导致相关区域的三维绿量公平性等级较低，人口－三维绿量供需水平较差；而建成区外围区域则更多为风景游憩绿地，人口密度相对偏低，从而具有较高的三维绿量公平性等级。

基于研究结论，武汉市建成区三维绿量的公平性提升应关注以下两方面：1）将绿地建设规划编制中引入三维绿量的相关指标，如绿色空间容积率等，增强对三维绿量的管理和调控，加快从单一的二维绿地规划到二维绿地－三维绿量协同规划模式的转变。2）在城市绿地景观单一的区域和建筑较为密集的低绿量区域，可通过提升景观丰富度、引入垂直绿化等方式提升三维绿量，促进绿地的公平性提升。

研究还尚存一些不足：在三维绿量的计算过程中，只对依据植被的简化几何体进行估算，缺乏不同类型植被的差异影响评估；在绿地的公平性评价方面，研究仅对人口－三维绿量的需求进行分析，未将绿地质量和生态绩效纳入考虑。后续研究可以引入可达性和满意度等评价等绿地绩效指标，实现更全面的绿地公平性分析。

## 5　结论

武汉市建成区及建成区内各辖区的绿地空间资源分配都处于差距悬殊的状态。人口－三维绿量分布匹配程度较差，公平性等级较低，其中低等级绿量占有量人群人口占比最大；高等级绿量占有量人群绿地资源面积占比最大。区位熵呈现由边缘至中心递减的空间分布趋势。高等级区位熵区域位于生态环境良好、景观丰富的公园以及风景区；低等级区位熵则出现于景观单一的区域。

本研究在评估城市绿地公平性研究方面具有一定理论和实践价值。在理论上，验证了绿地资源在城市中存在的不公平特性，与绿地分配公平理论一致，低等级绿量占有量人口占比较多，需要更多绿地资源的分配来促进公平性。在方法上，建立了一种基于三维绿量对城市绿地公平性进行评估的研究方法，对于武汉市建成区公平性的评估以及对未来优化城市绿量资源分配具有一定参考意义。

**参考文献**

[1]LIU M J.The role of urban green space in alleviating the urban heat island effect [J]. Environment, Resource and Ecology Journal,2024,8(1):6-11.

[2]郝学军,朱烨,周海珠.城市街谷热岛效应研究进展[J].科学技术与工程,2024,24(16):6576-6591.

[3]周聪惠.公园绿地规划的“公平性”内涵及衡量标准演进研究[J].

中国园林，2020，36(12)：52-56.

[4] HE S W，WU Y L，WANG L.Characterizing horizontal and vertical perspectives of spatial equity for various urban green spaces：a case study of Wuhan，China[J].Frontiers in Public Health，2020，8：10.

[5] RUTT R L，GULSRUD N M.Green justice in the city：a new agenda for urban green space research in Europe[J].Urban Forestry & Urban Greening，2016，19：123-127.

[6] XU Y，REN C，MA P F，et al.Urban morphology detection and computation for urban climate research[J].Landscape and Urban Planning，2017，167：212-224.

[7] XU H，QIN H，LI H，et al.Research on supply fairness evaluation and optimized layout of urban green space in Xuzhou Quanshan district，China[J].Applied Ecology and Environmental Research，2023，21(3)：2157-2171.

[8] NERO B F.Urban green space dynamics and socio-environmental inequity：multi-resolution and spatiotemporal data analysis of Kumasi，Ghana[J].International Journal of Remote Sensing，2017，38(23)：6993-7020.

[9] KABISCH N，HAASE D.Green justice or just green？Provision of urban green spaces in Berlin，Germany[J].Landscape and Urban Planning，2014，122：129-139.

[10] 王梁飞，郭晓华.生活圈视角下的绿地空间正义[J].中国城市林业，2021，19(5)：83-88.

[11] LING T Y，HUNG W K，LIN C T，et al.Dealing with green gentrification and vertical green-related urban well-being：a contextual-based design framework[J].Sustainability，2020，12(23)：10020.

[12] 周坚华，孙天纵.三维绿色生物量的遥感模式研究与绿化环境效益估算[J].环境遥感，1995(3)：162-174.

[13] 陈自新，苏雪痕，刘少宗，等.北京城市园林绿化生态效益的研究(2)[J].中国园林，1998(2)：49-52.

[14] SIMON H，SINSEL T，BRUSE M.Introduction of fractal-based tree digitalization and accurate in-canopy radiation transfer modelling to the microclimate model ENVI-met[J].Forests，2020，11(8)：869.

[15] 韩贵锋，卢雨蓉.城市公园的视觉可达性评估方法研究[J].风景园林，2021，28(1)：93-98.

[16] 周聪惠，宗媛.基于机器学习的三维绿量可达公平性演进研究[J/OL].中国园林，2024.(2024-12-19).https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx？filename=ZGYL20241218001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.

[17] 殷利华，任卓玥，陈明.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[J].中国城市林业，2025，23(5)：9-18.

[18] 车旭恒，朱君君，张立维，等.武汉市极端降雨与气候因子的响应研究[J].中南民族大学学报(自然科学版)，2025，44(3)：319-326.

[19] 杜冠儒.武汉市建成区园林绿地碳储量估算及提升路径研究[D].湖北大学，2024.

[20] ZHOU Z，CHEN A，ZHU T，et al.Construction of green volume quantity and equity indicators for urban areas at both regional and neighborhood scales：a case study of major cities in China[J].Land，2025，15(1)：35.

[21] LANG N，JETZ W，SCHINDLER K，et al.A high-resolution canopy height model of the Earth[J].Nature Ecology & Evolution，2023，7(11)：1778-1789.

[22] 张连翀.跨管理域遥感数据服务中的代理技术研究[D].北京：中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所)，2019.

[23] THOMSON D R，LEASURE D R，BIRD T，et al.How accurate are WorldPop-Global-Unconstrained gridded population data at the cell-level？：a simulation analysis in urban Namibia[J].PLoS One，2022，17(7)：e0271504.

[24] 谢丽琼，邓星晗.绿量的研究进展[J].林业调查规划，2013，38(5)：35-39.

[25] MA X Y，ZOU Q H，LIU M，et al.Comparative research on typical measure methods of the carbon sequestration benefits of urban trees based on the UAV and the 3D laser：evidence from Shanghai，China[J].Forests，2022，13(5)：640.

[26] 孙晓，谭炳香.高光谱遥感森林叶面积指数估测方法研究[J].中国城市林业，2012，10(4)：1-4.

[27] DE LOMÉ TOGO U，AGBOKOU K，MENSAH Y，et al.Varying bandwidth parameter method on Kernel Gini index estimation[J].Annals of the University of Craiova Mathematics and Computer Science Series，2023，50(1)：29-41.

[28] 刘畅，王一婷，郭晓华，等.基于绿视率的武汉市绿地公平性评价[J].应用生态学报，2023，34(4)：1083-1090.

[29] LI B，LI S N，LEI H J，et al.Application of high-spatial-resolution imagery and deep learning algorithms to spatial allocation of urban parks' supply and demand in Beijing，China[J].Land，2024，13(7)：1007.

[30] 党辉，李晶，张渝萌，等.基于公平性评价的西安市城市绿地生态系统服务空间格局[J].生态学报，2021，41(17)：6970-6980.