专题：城市森林与城市热缓解

城市公共空间绿视率对多时态热舒适度的影响*

毛志睿[1]　李雨航[1]　陈笑葵[2,3]

1　昆明理工大学建筑与城市规划学院　昆明　650504

2　湖南城市学院建筑与城市规划学院　湖南益阳　413000

3　数字化城乡空间规划关键技术湖南省重点实验室　湖南益阳　413000

摘要：【目的】为优化城市热环境与人居品质提供新视角。【方法】以武汉市江岸区滨水地段为例，结合街景数据与遥感气候数据，利用深度学习与 ENVI-met 模拟计算绿视率和生理等效温度（PET），分析其时空特征，探讨绿视率对热舒适度的影响。【结果】1）武汉市江岸区滨水地段内，绿视率受区域特征影响呈现分布差异；2）7∶00—15∶00，不同城市空间热舒适度（PET）变化速率不同，历史街区内部>街道区域>滨水公园区；3）绿视率与 PET 的负相关性随时间变化显著，早晨至中午逐渐增强，中午 12∶00 达到峰值后减弱；4）绿视率对 PET 的影响存在边际递减效应，绿视率在 43.9%～47.3%时对 PET 的降低作用最显著（$P<0.05$），超过此范围后改善效果减弱；5）绿视率对热环境稳定性的影响显著，高绿视率显著减小了 PET 的日变化幅度，表现为更稳定的热环境和更小的日温差。【结论】城市空间类型显著影响热环境动态特征；绿视率与 PET 呈负相关关系，其调控效应在日间辐射峰值时段（12∶00 前后）最强且存在边际递减规律；合理配置绿视率是提升热舒适度的关键。未来需进一步探究多气候条件下绿视率与植被类型、配置方式的关联机制。

关键词：多时态热舒适度；绿视率；语义分割；微气候模拟；边际递减效应

DOI：10.12169/zgcsly.2025.01.04.0001

Influences of Green View Index of Urban Public Space on Multi-Temporal Thermal Comfort

Mao Zhirui[1]　Li Yuhang[1]　Chen Xiaokui[2,3]

(1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China; 2. College of Architecture and Urban Planning, Hunan City University, Yiyang 413000, Hunan, China; 3. Key Laboratory of Hunan Province for Key Technologies of Digital Urban-Rural Spatial Planning, Yiyang 413000, Hunan, China)

Abstract: 【Objective】 The study is to provide a new perspective for optimizing the urban thermal environment and residential quality. 【Method】 The waterfront sections of Jiang'an District in Wuhan are taken as a case study to calculate green view index (GVI) and physiologically equivalent temperature (PET) by integrating street-view imagery and remote sensing climate data with deep learning and ENVI-met simulations to examine their spatiotemporal characteristics and discuss the GVI's impact on thermal comfort. 【Result】 1) The distribution of GVI in the waterfront sections of Jiang'an District varies due to regional characteristics; 2) At 7∶00-15∶00, the PET presents varied rates across urban spaces of different kinds, i. e., historical district interiors > street areas > waterfront parks; 3) The significant

收稿日期：2025-01-04

*基金项目：国家自然科学基金项目（52168004）

第一作者：毛志睿（1972-），男，博士，教授，研究方向为遗产地文化景观等。E-mail：286604737@qq.com

通信作者：李雨航（1999-），女，硕士生，研究方向为遗产地文化景观规划。E-mail：1285128224@qq.com

negative correlation between GVI and PET strengthens from morning to noon, peaking at 12∶00 before weakening; 4) GVI has a diminishing marginal effect on PET. The GVI, when in the range of 43.9%-47.3%, has the most substantial subduing effect on PET, and the effect will reduce beyond the scope; and 5) GVI significantly enhances thermal environment stability. High GVI reduces PET's diurnal variation, leading to a more stable thermal environment with smaller temperature fluctuations. This not only improves thermal comfort, but also increases urban climate stability.【Conclusion】Urban spatial typology shapes thermal dynamics, with GVI negatively correlated with PET. Its cooling effect peaks around 12∶00 and follows a marginal diminishing pattern. The optimal GVI configuration is the key to improving thermal comfort. Future studies should explore GVI's interactions with vegetation types and spatial configurations under varying climates.

Keywords: multi-temporal thermal comfort; green view index (GVI); semantic segmentation; microclimate simulation; diminishing marginal effect

随着我国城市化进程不断推进，城市热岛效应的持续加强，对全球自然生态系统造成了不可逆转的冲击[1]，对城市居民的健康产生显著的负面影响，城市微气候及热舒适研究日益得到重视。研究表明，热舒适度与相对湿度、地表透水面积、街道高宽比和行道树三维绿量呈显著正相关，与热环境因子（如太阳辐射、空气温度（Ta）、地表温度）、天空可视因子、建筑密度呈显著负相关[2-4]。可见，植物与热环境是紧密相关的。植被对热舒适度的改善效果在一天内呈先上升后下降的钟形曲线，但每增加相同数量的树木，其降温效果会减弱[5-6]。在植物配置方面，等间距排布的乔木和乔灌草种植方式的热舒适度改善效果强于其他种植方式[5-8]。高叶面积指数、大冠幅的树木对热舒适度的改善效果最明显[9-11]。

然而，传统讨论植被与热舒适度关联性的研究较少考虑人与环境的互动关系。1987年，日本学者青木阳二首次提出“绿视率（Green View Index，GVI）”的概念，定义绿视率为人眼观察到的图像中绿色所占的面积百分比。事实上，绿视率对人本视角下植物与环境的作用有着重要意义，探究绿视率对热舒适度的影响，可以为优化城市热环境提供新视角。有学者基于此认识开展研究发现，绿视率与平均气温呈负相关，与相对湿度呈正相关，对生理等效温度（Physiological Equivalent Temperature，PET）有显著的正向影响[12-14]。

但值得注意的是，热舒适度在一天中会随时间的推移而发生变化。已有研究主要关注日均值或特定时段的的静态分析（热舒适度与绿视率呈正相关），缺乏对热舒适度日变化趋势的动态解析，从而缺乏绿视率在不同时间段对热舒适度具体影响的系统分析，且因样本量较小，现有研究在绿视率与PET关系的定量分析上仍存在统计学支撑不足的问题，导致无法探究不同绿视率对PET的改善程度。

本文以武汉市江岸区滨水地段为例，获取街景数据与夏季高温月份期间气候数据，借助深度学习语义分割方法计算绿视率，并采用ENVI-met进行多时段热舒适度评价，在分析其时空特征的基础上，进一步探究不同城市空间热舒适度（PET）日变化速率，不同绿视率条件下热舒适度（PET）日变化的剧烈程度，以及不同绿视率对热舒适度（PET）的影响程度，并提出相应设计改善策略，以期为城市绿地系统规划和城市更新实践等提供参考和借鉴。

1 研究区概况

武汉（29°58′—31°22′N，113°41′—115°05′E）因夏季酷热被称为“四大火炉”之一，尤其在历史街区中，特殊的建筑布局、街巷形态以及高人口密度凸显了热环境与绿色空间关联研究的重要性。武汉的气候属于北亚热带季风性湿润区，热量充足、雨热同季、冬冷夏热、四季分明，年平均气温为15.8～17.5 ℃，极端最高气温可达41.3 ℃（1934年8月10日），城市热环境质量相对较低。为保证测点具有代表性与研究性，参照欧克（Oke）教授提出的局地气候分区（LCZ）方法[15]，经实地考察，结合人群室外活动属性，确定武汉市江岸区汉口江滩公园、里分历史街区及其周边住宅区和武汉市政府为具体研究范围。

2　研究方法

2.1　数据来源

2.1.1　气象数据

参照 2022 年武汉夏季（6、7、8 月）各气象参数平均值，选定 2022 年 8 月 1 日作为典型夏季日。模拟气象数据来源于美国国家航空航天局（NASA）遥感数据，数据形式为 MERRA-2，其中 Ta、相对湿度、风速数据获取高度为垂直地面 2 m，风向数据获取高度为 10 m[16]。

2.1.2　街景数据

以 2022 年百度街景照片（与气象数据 2022 年 8 月 1 日一致）为公共空间绿视率计算基础，通过获取 OSM 交通路网数据并参考 WGS-84 坐标系获取街道信息。利用 ArcGIS 提取所有街道交叉点后，以 50 m 为间隔进行描点，共获得 392 个爬取点并批量获取 360°全景街景。因部分点位位于廊桥或涵洞等无植被干扰区而被剔除，最终保留 363 张全景街景及对应采样点。

2.2　ENVI-met 模型搭建

PET 是基于热平衡模型 MEMI 提出来的一个热环境综合指标，不仅包含 Ta、相对湿度、风速、太阳辐射等常见气象参数，还考虑个体热生理因素，如着衣量、新陈代谢量、性别、年龄、身高和体重等[4]。故使用 PET 作为热舒适度评价指标。

基于实地测量数据，构建研究区域的 ENVI-met 数值模型[17]，利用获取的建筑物几何形态、下垫面属性及植被分布信息作为模型输入。为确保模拟结果的网格独立性，采用网格收敛性分析方法，对比 1、3、5 m 3 种网格分辨率下 PET 的关键驱动参数——Ta 和平均辐射温度（MRT）的模拟精度。结果表明：3 m 网格分辨率下 Ta 的模拟结果与 1 m 网格的均方根误差（RMSE）小于 1%，显著优于 5 m 网格（RMSE = 4.5%）；MRT 的模拟结果同样显示 1 m 与 3 m 网格间的 RMSE 小于 2%，满足 Schatzmann 等推荐的网格收敛标准[18]。基于计算效率与精度的综合考量，最终确定 3 m×3 m×3 m 为最优网格分辨率。

为保证模型最大高度超过建筑物的最大高度 45 m，在垂直方向上设置 30 个格网，形成 inx 三维模拟模型文件。模拟时段为 2022 年 8 月 1 日 7：00—16：00（共 9 h），以捕捉日间热环境动态变化。模型初始条件及边界条件参数详见表 1~3。

表 1　模型基本参数

输入参数	输入值	输入参数	输入值
x 方向网格数	385	x 方向网格单元大小/m	3
y 方向网格数	400	y 方向网格单元大小/m	3
z 方向网格数	30	z 方向网格单元大小/m	3

表 2　乔木灌木初始模拟设置参数

类型	树高/m	树宽/m	叶密度指数（LAD）
乔木	25	22	1.1
乔木	15	9	1.1
乔木	15	9	0.3
乔木	7	5	0.4
灌木	3	3	0.3

注：叶密度指数是指植物某一高度单位立方米空间中的叶片总面积。

表 3　气象和地表参数

参数配置	输入参数	输入值
气象参数	逐时气温/℃	33.62（max）
		29.57（min）
	逐时相对湿度/%	79.79（max）
		63.02（min）
	逐时风速/m·s^{-1}	408（max）
		3.91（min）
地表参数	地表反射率	沥青路面 0.17；砖石路面 0.30；土壤地面 0.2
	地表比辐射率	沥青路面 0.95；砖石路面 0.90；土壤地面 0.9

使用 ENVI-met 中的 Biomet 组件对 PET 进行计算，生成研究范围内逐小时的 PET 值。结合 ISO 2007 和 ISO 2004 的相关标准，在 Biomet 中将人体参数设置为一名身高 1.75 m，体重为 75 kg 的 35 岁男性，静态衣物保温指数设为 0.5，代谢率约为 86.21 W·m^{-2}（步行或简单活动）。

2.3 图像语义分割和绿视率计算

2.3.1 基于深度学习的图像语义分割

在绿视率的量化研究中，有学者通过图片的颜色像素点来计算绿视率[19-20]，但基于 RGB、HSL 颜色等的传统方法存在效率与精确度低等不足[21]，深度学习在识别精度与效率上优于颜色提取法[22]。有学者搭建了深度学习语义分割模型，分析北京三环内绿视率的空间分布特征[23-24]。在绿视率与二维遥感影像的研究中，有学者通过语义分割研究了绿视率和归一化植被指数（NDVI）的相关性和作用关系[25-27]。

本研究基于 ADE20K 数据集，使用 MXNet 深度学习库中的 GluonCV 计算机视觉工具，采用 DeepLab v3 算法（图 1）训练的语义分割模型，对街景图像的物理特征进行分割和提取。该模型能够将街景图像分割成道路、建筑、树木等 150 种物理特征，分类较为全面，能胜任对城市空间中组成要素的物理特征分割任务。对 363 张街景全景进行语义分割，得出采样点语义分割结果。

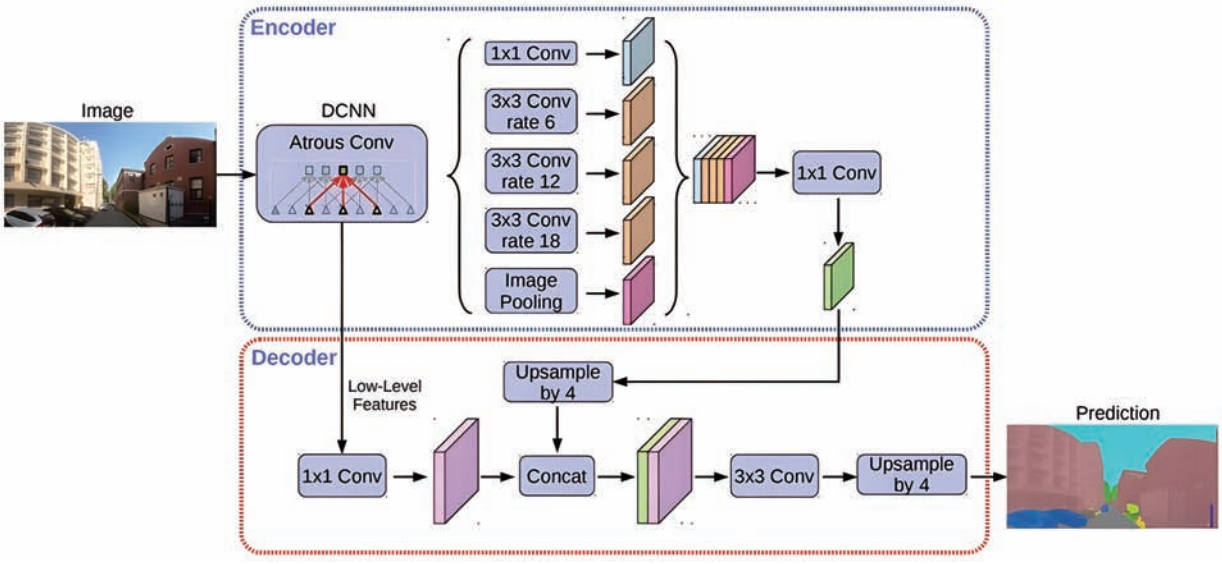


图 1 DeepLab v3 算法网络结构

2.3.2 绿视率计算

将 363 张全景街景语义分割后的结果数据导入 ArcGIS，添加字段“绿视率”，设为“浮点型”，用公式“绿视率 = [tree] + [grass] + [plant]”得出点位绿视率。

2.4 统计分析

所有的统计分析采用 SPSS 与 MATLAB R2022a 进行。首先，将数据分为历史街区内部、街道区域、滨水公园区 3 部分，通过线性回归计算 7：00—15：00 PET 的每小时变化率（斜率），探究不同城市空间的 PET 日变化速率。对每个区域内的样本，以时间（7：00 = 0 至 15：00 = 8）为自变量，PET 为因变量，拟合回归方程：

$$PET = \beta_0 + \beta_1 \times 时间 \quad (1)$$

式（1）中：斜率 β_1 为每小时升温速率（℃·h^{-1}）；β_0 表示 7：00 的 PET 值（℃）。计算各区域的平均升温速率及 95% 置信区间。其次，将 363 个采样点的绿视率与逐时 PET 作为分析样本，通过皮尔逊相关分析，探讨绿视率与多时态 PET 之间在 7：00—15：00 是否存在相关性。第三，通过计算 9 h 内各采样点 PET 的变异系数，与其测点的绿视率进行相关性分析，进一步研究绿视率对 PET 日变化程度的影响。第四，为了探究 8：00—15：00 各小时绿视率对 PET 的改善程度，进行了变化率分析：首先使用 *polyfit* 函数进行绿视率—PET 的 9 阶多项式拟合，用 *polyval* 函数计算拟合曲线的值，绘制各时段绿视率与 PET 的拟合曲线并构建置信区间，展现其变化趋势；

随后，用 *polyder* 函数对每小时拟合曲线求导，进一步衡量绿视率对各时态 PET 的影响程度。导数值用于量化绿视率对 PET 瞬时影响的大小和方向，具体而言，导数绝对值越大，绿视率微小变化对 PET 影响越显著，正值表示绿视率增加导致 PET 升高，负值则表示绿视率增加导致 PET 降低。为量化多项式模型对数据的解释能力，本研究计算了各时段拟合模型的 R^2 值。

3　结果与分析

3.1　绿视率分布特征

根据日本教授折原夏志提出的绿视率评价方法，将绿视率划分成 5 类：≤0.05 为不及格、0.05~0.15 为较差、0.15~0.25 为一般、0.25~0.35 为良好、>0.35 为优秀[28]。本研究中绿视率不及格的采样点数量为 78 个，占总数 20.0%；绿视率较差的采样点数量为 91 个，占总数的 23.0%；绿视率一般的采样点有 105 个，占总数的 26.6%；绿视率良好的采样点有 67 个，占总数的 17.0%；绿视率优秀的采样点有 53 个，占总数的 13.4%。其中，京汉大道、中山大道、二曜路、一元小路等街道绿视率水平不及格，胜利街、四唯路、公安横街等街道绿视率水平较差（图 2）。

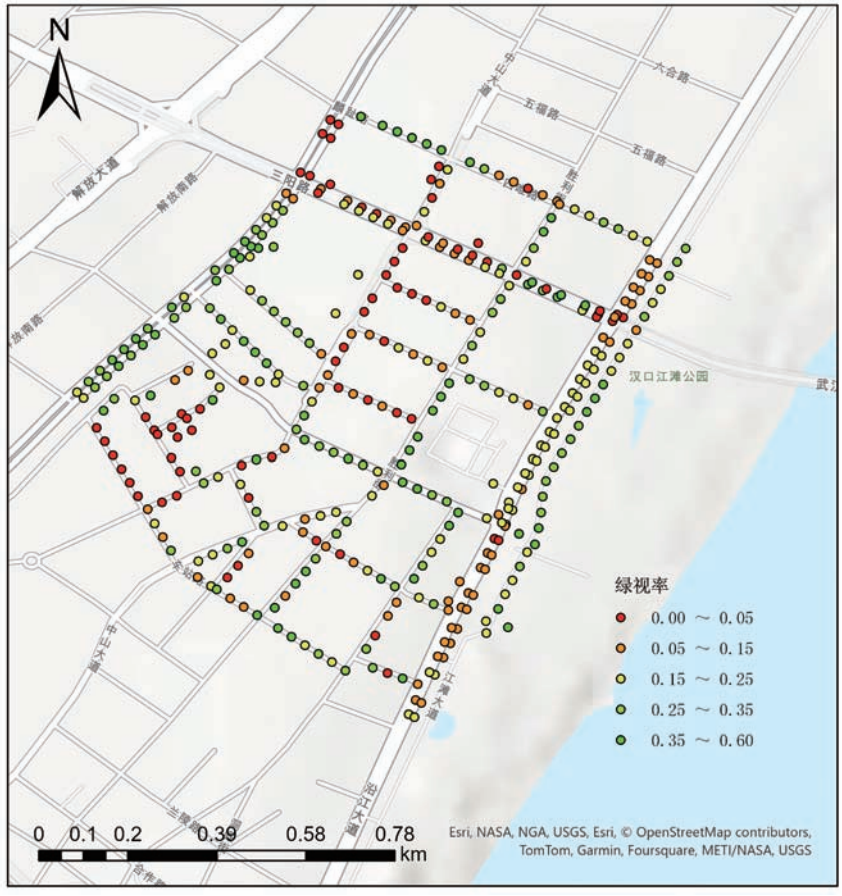


图 2　各采样点绿视率

结合实地调研，绿视率受区域特征影响呈现分布差异：历史街区（如坤厚里）由于建筑密度高、街道狭窄（平均宽度<5 m），且受历史保护限制，绿化空间有限，主要依赖小型盆栽，导致绿视率普遍低于 15%；城市街道虽规划有集中绿地，但乔木覆盖率不足且冠幅较小（<5 m），绿视率集中在 15%~25%；滨水公园及武汉市政府区域乔木覆盖率高、部分采用乔灌草复层结构，冠幅宽广（>6 m），形成连续林荫覆盖，绿视率可达 35%~60%。

3.2　热舒适度

由图 3 可知，研究区 7：00—15：00 的 PET 情况各不相同。街道区域的 PET 低于历史街区内部，建筑较为密集且楼高较低的“里分”历

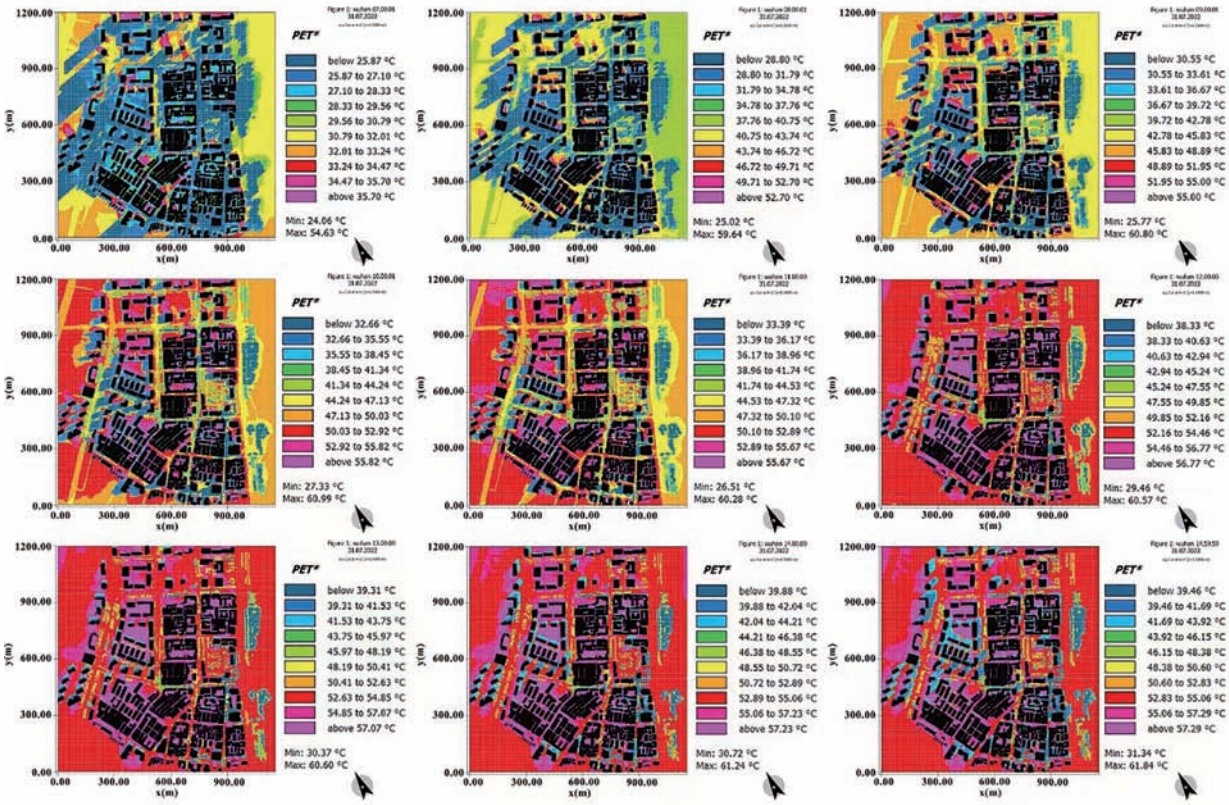


图 3 PET 计算结果

史街区的 PET 较高，滨水公园区的 PET 较低。研究区 7：00—15：00 的 PET 随时间的推移而增高。7：00—15：00 PET 的每小时变化率大小为历史街区内部（3.32 ℃ · h^{-1}）>街道区域（2.21 ℃ · h^{-1}）>滨水公园区（1.55 ℃ · h^{-1}）（表 4）。

表 4 不同城市空间 PET 日变化速率

区域	样本量	平均升温速率（℃ · h^{-1}）	95%置信区间
历史街区内部	45	3.32	（3.27，3.37）
街道区域	286	2.21	（2.14，2.28）
滨水公园区	32	1.55	（1.48，1.62）

3.3 绿视率与逐时 PET 相关性

从图 4 可以看出：7：00 时，绿视率和 PET 之间没有明显的相关趋势；从 8：00—15：00，绿视率和 PET 之间均存在显著的负相关趋势；7：00、8：00、14：00、15：00 这 4 个时间点的 PET 数据波动情况较大。

由表 5 可知，PET 与绿视率在 8：00—15：00 均呈显著的负相关关系，而在 7：00 时的负相关性较弱。早晨到上午，从 7：00 开始，随着时间推进，绿视率与 PET 之间的负相关性逐渐增强。在中午，即接近 12：00 时，绿视率与 PET 之间的负相关性达到最强。随着时间向下午推进，绿视率与 PET 之间的负相关性开始减弱。

3.4 绿视率与 PET 极差相关性

PET 极差与绿视率间的显著（$P<0.01$）相关，说明随着绿视率的增加，PET 极差往往减少，即绿视率越高，日间 PET 变化的剧烈程度越低。

3.5 PET 变化率

由上文可知，绿视率与 PET 显著负相关，仅极少导数值为正，故仅探讨负值情况。7：00 时绿视率与 PET 的负相关性较弱，故未对其进行探讨。此外，由于绿视率大于 0.57 的样本较少，分析中未包含该部分数据。利用遥感数据构建的城市热岛效应模型，R^2 通常介于 0.4~0.7，这一范围的模型具有实际意义[29]。结果显示，所有时间点的 R^2 值均高于 0.4，能够有效解释绿视率与 PET 之间的关系（图 5）。其中，12：00 的 R^2 值达到峰值（R^2 = 0.758 6），与 3.3 节中负相关性最强的结果一致。

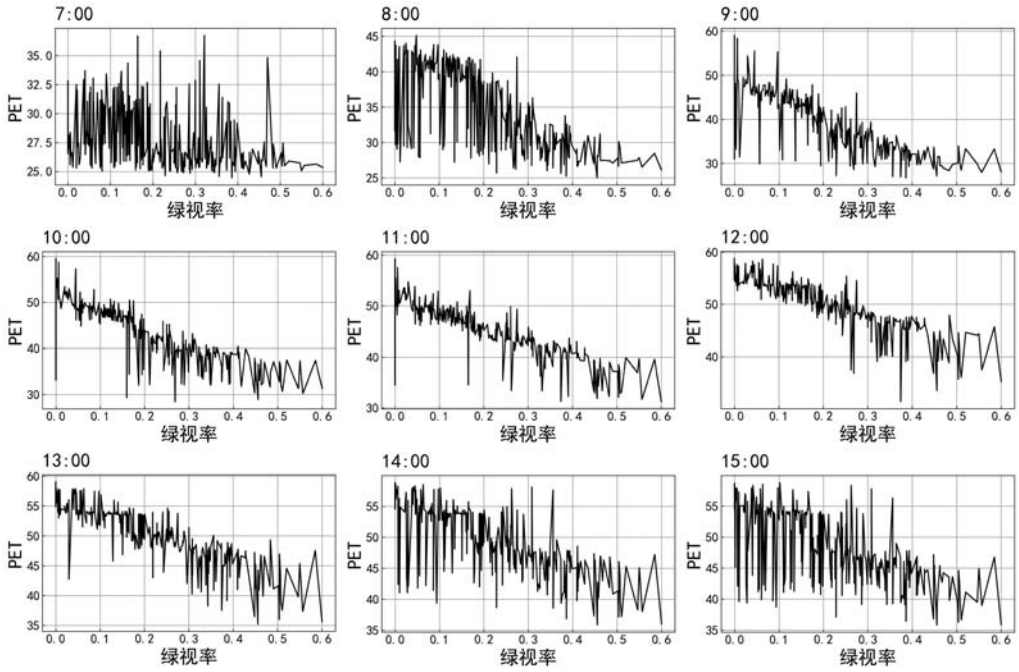


图 4　不同时间点绿视率和 PET 值的折线图

表 5　PET 及其极差与绿视率相关系数

	绿视率	7：00 PET	8：00 PET	9：00 PET	10：00 PET	11：00 PET	12：00 PET	13：00 PET	14：00 PET	15：00 PET	PET 极差
绿视率	1. 000										
7：00 PET	0. 318 **	1. 000									
8：00 PET	0. 697 **	0. 408 **	1. 000								
9：00 PET	0. 814 **	0. 341 **	0. 769 **	1. 000							
10：00 PET	0. 847 **	0. 289 **	0. 666 **	0. 821 **	1. 000						
11：00 PET	0. 855 **	0. 285 **	0. 651 **	0. 766 **	0. 813 **	1. 000					
12：00 PET	0. 864 **	0. 277 **	0. 681 **	0. 773 **	0. 839 **	0. 873 **	1. 000				
13：00 PET	0. 845 **	0. 266 **	0. 654 **	0. 720 **	0. 778 **	0. 805 **	0. 893 **	1. 000			
14：00 PET	0. 713 **	0. 210 **	0. 584 **	0. 621 **	0. 661 **	0. 647 **	0. 739 **	0. 821 **	1. 000		
15：00 PET	0. 634 **	0. 183 **	0. 528 **	0. 556 **	0. 580 **	0. 578 **	0. 658 **	0. 712 **	0. 867 **	1. 000	
PET 极差	0. 691 **	0. 257 **	0. 418 **	0. 561 **	0. 630 **	0. 647 **	0. 734 **	0. 780 **	0. 750 **	0. 669 **	1. 000

注：** 表示相关性在 0. 01 水平（双侧）上显著。

如图 6 和表 6 所示，各时段绿视率与 PET 导数绝对值极大值之间存在明显差异：8：00 时，绝对值极大值对应的绿视率为 0. 219；9：00 时出现 0. 046、0. 193、0. 396 3 个波谷，其中 0. 193 时导数绝对值最大；10：00 时有 0. 185、0. 438 两个波谷，0. 185 时最为显著；11：00 时有 0. 042、0. 208、0. 439 共 3 个波谷，以 0. 439 时最大。12：00时，绿视率达到 0. 461 时 PET 导数绝对值达到极大值；13：00 和 14：00 时均在 0. 470 处出现极大值；15：00 时有 0. 192、0. 473 两个波谷，其中 0. 473 时的导数绝对值最大。PET 导数绝对值极大值所对应的绿视率对 PET 的差异均达到显著水平。

如表 7 所示：8：00—10：00，绿视率在 0. 185 ~ 0. 219 时，对 PET 的降低作用最大；10：00时，绿视率在 0. 185 和 0. 438 时，均对 PET 有明显的降低作用；11：00—15：00，绿视率小于 43. 9%时，对 PET 的降低作用较小，绿视率在 0. 439 ~ 0. 473 时，对 PET 的降低作用最大（P<0. 05）。随着绿视率继续增加，其对 PET 的改善作用越来越小。

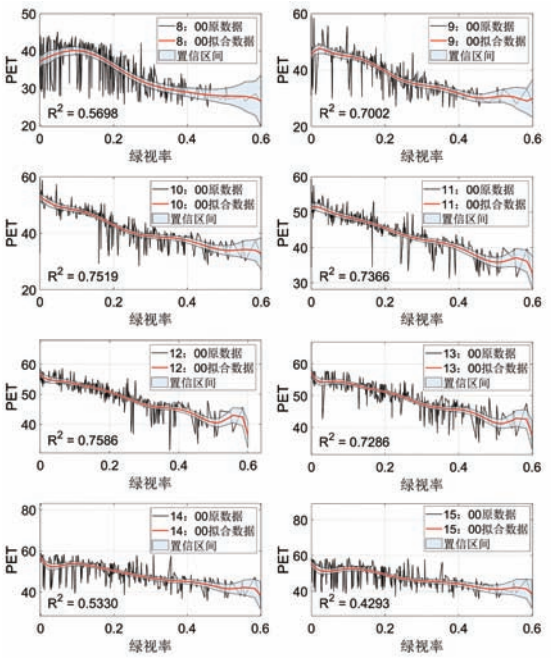


图 5 PET-绿视率拟合曲线

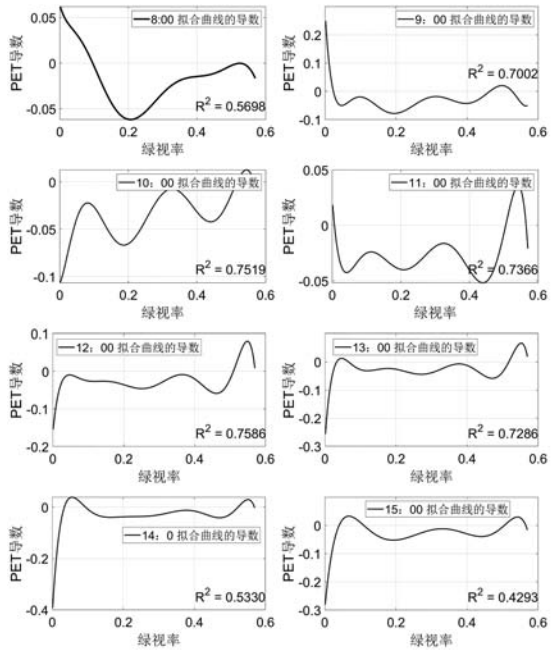


图 6 PET-绿视率拟合曲线的导函数

表 6 PET 导函数波谷值

	8：00	9：00	10：00	11：00	12：00	13：00	14：00	15：00
PET 导函数波谷处的绿视率	0. 219	0. 046 0. 193 0. 396	0. 185 0. 438	0. 042 0. 208 0. 439	0. 461	0. 47	0. 47	0. 192 0. 473

表 7 PET 导数极值

	8：00	9：00	10：00	11：00	12：00	13：00	14：00	15：00
PET 导数绝对值极大值时的绿视率	0. 219	0. 193	0. 185	0. 439	0. 461	0. 470	0. 470	0. 473
置信区间*	(0. 145,0. 293)	(0. 179,0. 207)	(0. 170,0. 200)	(0. 427,0. 451)	(0. 45,0. 472)	(0. 458,0. 482)	(0. 453,0. 487)	(0. 452,0. 494)

注：* $\alpha = 0.95$。



图 7 最佳绿视率范围街景图像

乔木凭借更高冠层与更大冠幅，可为人行空间提供大面积遮荫，并通过较大叶面积和蒸腾作用实现降温增湿[7]；灌木和草本虽高度较低，但能提升局部绿视率并减少地表热辐射[30]。树木的间距、冠幅、密度及复层种植等配置方式，会影响遮荫面积、空气流动与蒸腾量，进而影响热舒适度[5]。本

研究区域乔木占比高，对 PET 降低效果最明显的绿视率阈值主要集中在乔木覆盖率高的区域（图 7），样本中乔草或乔灌草复层结构较少。由于不同植被类型与配置方式存在光环境调节和蒸腾效率差异，目前得到的绿视率阈值（0.439～0.473）更适用于以等间距列植乔木为主的街道绿化形式。

4　讨论

已有研究指出，绿视率与 PET 呈负相关[3,12]，本研究结果与之相符，进一步说明提升绿视率能够有效改善热舒适度。这种负相关关系主要源于植物的遮荫效应与蒸腾作用。尤其是在上午时段，随着太阳辐射强度的增加，绿视率较高的区域通过降低直接辐射并增加局部空气湿度[31]，显著降低了 PET 值。不同区域的 PET 上升速率不同，其中历史街区内部或由于狭窄街巷导致风速降低，且绿视率水平不及格，太阳辐射直射地面比例高，加剧热积累速度；街道区域通风条件较好，绿视率水平大部分为一般至良好，共同减缓了温度上升；武汉市政府及滨水公园升温速率最低可能是由于乔木遮阴使太阳辐射减少，蒸腾作用显著降低地表温度。

植被对热舒适度的影响在一天内呈现先上升后下降的钟型曲线[31]，本研究中绿视率对 PET 的影响与之基本一致，且在中午时段（12：00—13：00）达到峰值，这可能是由于此时太阳高度角和辐射强度均处于最大值，植被的遮荫效果和蒸腾作用对减少热量积累发挥了最显著的作用。然而，本研究发现绿视率对热舒适度的改善效果并非无限增加，当绿视率超过 47.3%时，其对 PET 的降低作用逐渐减弱，表现出边际递减效应。这与已有研究一致[5,7,10]，即当植被覆盖密度过高时，可能会导致局部空气流动受阻，从而降低蒸腾效率和散热能力。

本研究通过求导方法进一步量化了绿视率在不同时间段对 PET 的具体影响程度，并提出了适合各时间段的最佳绿视率范围，这与已有研究成果一致，即强调了合理的绿视率比例与空间布局在优化热环境中的重要性[6-7, 10]。与前人研究不同，7：00 时绿视率与 PET 之间未发现显著相关性，这可能是因为太阳高度角较低，建筑物遮挡了大部分太阳辐射且太阳辐射强度较弱，植被的遮荫和蒸腾作用未能显现，并且由于这一时段热环境影响较轻，绿视率的调节效果不明显。此外，老旧住区受高温热浪影响严重，公园绿地较好[32]，本文研究结果与之基本相似。

不同绿视率条件下，PET 的日变化幅度与绿视率呈显著负相关。这一现象可以通过城市绿地的微气候调节功能来解释。高绿视率区域由于植被的持续蒸腾与遮荫效应，降低了白天的温度波动幅度，从而提升了热环境的稳定性。本研究提出的最佳绿视率范围（43.9%～47.3%）为城市绿地设计与布局提供了明确的量化参考。在实际应用中，城市规划者可根据不同时间段的热环境需求，合理配置绿地比例。绿视率的边际递减效应表明，绿化并非越多越好，合理的绿视率范围才是优化城市热环境的关键。

本研究仍存在一些不足：首先，研究仅针对夏季高温天气，未涵盖不同季节、气候条件下的绿视率作用。其次，未结合实际植被类型与配置方式进行综合考量，绿视率具体如何指导城市绿地系统规划尚不清楚，未来研究可探索不同植被类型、植物配置和植物种类与绿视率的关系。

5　结论

1）武汉市江岸区滨水地段内，绿视率受区域特征影响呈现分布差异；2）7：00—15：00，不同城市空间热舒适度（PET）变化速率不同，历史街区内部>街道区域>滨水公园区；3）绿视率与 PET 负相关性随时间变化显著，早晨至中午逐渐增强，中午 12：00 达到峰值后减弱，表明其优化作用集中在日间太阳辐射较强时段；4）绿视率对 PET 的影响存在边际递减效应，绿视率在 43.9%～47.3%时对 PET 的降低作用最显著（$P<0.05$），超过此范围后改善效果减弱，说明合理配置绿视率是提升热舒适度的关键；5）绿视率对热环境稳定性的影响显著，高绿视率显著减小了 PET 的日变化幅度，表现为更稳定的热环境和更小的日温差，不仅改善热舒适度，还增强了城市热环境的稳定性。6）未来可探索不同植被类型、植物配置和植物种类与绿视率的关系。

参考文献

[1]贾鑫睿，张鲲，袁溯阳，等.基于景观要素与夏季热舒适性的湿热地区城市公园吸引力研究[J].中国园林，2023，39（12）：114-119.

[2]WU J S,LIU C,WANG H L.Analysis of Spatio-temporal patterns and related factors of thermal comfort in subtropical coastal cities based on local climate zones[J]. Building and Environment, 2022,207:108568.

[3] YI P, LIU L Y, HUANG Y, et al. Study on the coupling relationship between thermal comfort and urban center spatial morphology in summer[J].Sustainability,2023,15(6):5084.

[4]王丹,肖作鹏,林姚宇.亚热带城市边缘区街道空间舒适感的气候与建成环境要素解析[J].现代城市研究,2023,38(7):107-114.

[5]解卫东,顾康康,常鑫悦,等.基于 ENVI-met 的高层住区乔木种植对人体热舒适度的影响研究[J].城市建筑空间,2022,29(3):78-81.

[6]帅林茹,冯莉,阳少奇.植被种植方式对城市微环境热舒适度影响的数值模拟研究[J].生态学杂志,2022,41(8):1611-1618.

[7]董冬,郤宇,罗毅,等.植被配置结构对人体热舒适度影响的数值模拟研究[J].环境与职业医学,2023,40(8):900-909.

[8]刘慧娇,张中一,冯国庆,等.聊城市东昌湖湿地公园植物空间秋季热舒适[J].中国城市林业,2024,22(1):177-183.

[9]何采蔚,郑森林.热湿气候下树种和种植模式对街道热舒适度影响的模拟研究[J].住宅与房地产,2023(11):12-17.

[10]骆心仪,赵阳,郭暄烨,等.基于热舒适的湿热地区露营地树木种植配置模式[J].中国城市林业,2023,21(4):127-134.

[11]胡琪琪,顾韩.室外热舒适影响因素及其评价指标研究进展[J].中国城市林业,2023,21(1):43-49.

[12]CHIANG Y C,LIU H H,LI D Y,et al.Quantification through deep learning of sky view factor and greenery on urban streets during hot and cool seasons[J].Landscape and Urban Planning, 2023,232:104679.

[13]SUN D,JI X,GAO W J,et al.The relation between green visual index and visual comfort in Qingdao coastal streets[J]. Buildings,2023,13(2):457.

[14]周宏轩,濮宏桐,崔璐璐,等.基于视觉指数的城市热环境效应:以徐州市为例[J].应用生态学报,2022,33(8):2213-2220.

[15] 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.

[16]GELARO R,MCCARTY W,SUÁREZ M J,et al.The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2)[J].Journal of Climate,2017,30(14):5419-5454.

[17]BRUSE M,FLEER H.Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model[J].Environmental Modelling & Software,1998,13(3/4):373-384

[18]CRANK P J,SAILOR D J,BAN-WEISS G,et al.Evaluating the ENVI-met microscale model for suitability in analysis of targeted urban heat mitigation strategies[J].Urban Climate,2018,26:188-197.

[19]YU X Y,QI W.Measuring vegetation greenery in park using iPhone panoramic image and a new green vegetation extraction index[J].Urban Forestry & Urban Greening,2021,65:127310.

[20]王洋洋,黄锦楼.基于绿视率的城市生态舒适度评价模型构建[J].生态学报,2021,41(6):2170-2179.

[21]刘晓天,孙冰,廖超,等.基于街景图像的城市街道绿视率计量方法比较分析[J].江西农业大学学报,2020,42(5):1022-1031.

[22]陶贵鑫,周宏轩,王昭清,等.道路绿视率不同识别方法比较研究:以徐州市为例[J].西北林学院学报,2024,39(2):156-165.

[23]XIA Y X,YABUKI N,FUKUDA T.Development of a system for assessing the quality of urban street-level greenery using street view images and deep learning[J]. Urban Forestry & Urban Greening,2021,59:126995.

[24]王鸿雁,车向红,徐辛超,等.利用 DeepLabv3+模型提取分析街景图像绿视率:以北京三环内为例[J].测绘通报,2024(3):88-94.

[25]ZHANG W Y,ZENG H.Spatial differentiation characteristics and influencing factors of the green view index in urban areas based on street view images:a case study of Futian District,Shenzhen, China[J].Urban Forestry & Urban Greening,2024,93:128219.

[26]吕旭昕,窦洛文,落昊飞,等.绿视率与 NDVI 值相结合的道路空间绿量可视性研究:以沣东新区为例[J].西北林学院学报,2022,37(3):239-245.

[27]苏雷,陈伟峰,李俊英,等.基于绿视率和 NDVI 的城市街道景观分析与优化研究[J].西北林学院学报,2024,39(2):256-264.

[28]折原夏志.緑景観の評価に関する研究--良好な景観形成に向けた緑の評価手法に関する考察[J].IBEC:建築環境・省エネルギー情報,2006,27(3):32-35

[29]黄昕,杨其全,马嵩,等.城市热环境遥感[M].北京:科学出版社,2022.

[30]白雪莲,乔荣荣,季树新,等.不同生活型植物非光合部分反射光谱和盖度的关系[J].生态学报,2022,42(1):186-195.

[31] ZHOU H X, TAO G X, NIE Y X, et al. Outdoor thermal environment on road and its influencing factors in hot, humid weather:a case study in Xuzhou City, China[J]. Building and Environment,2022,207:108460.

[32]黄海静,介鹏宇.高温热浪期间城市空间热环境特征及人群热舒适度评价研究:以重庆渝中区典型空间为例[J].现代城市研究,2024,39(1):98-106.