

基于机器学习的三维绿量可达公平性演进研究

周聪惠 宗媛

摘 要: 传统公平性测度聚焦于二维用地面积, 无法准确反映绿色资源实际分配情况。将高精度遥感影像数据与机器学习技术结合, 以南京主城区为例, 通过二维绿斑提取、三维绿量测算、可达公平性衡量、公平性演进特征分析4个环节展开研究。结果显示, 在无外部干预情境下, 二维绿斑分布不均将加剧三维绿量分配失衡。由于三维绿量在绿色空间大幅增减时分别呈现滞后性和急剧性特征, 其在城镇化进程中的公平性变化较二维绿斑更为复杂, 亟须专门调控手段来保障其公平配置。该成果能为绿色空间规划决策提供多维度依据, 并为规划方法改良提供新思路。

关 键 词: 风景园林; 绿色空间; 三维绿量; 规划; 公平性; 随机森林; 时空演进

文章编号: 1000-6664(2026)03-0053-07

DOI: 10.19775/j.cla.2026.03.0053

中图分类号: TU 986

文献标志码: A

收稿日期: 2024-05-22

修回日期: 2024-08-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51978146)

城市绿色空间具有社会、生态、经济等多重效益, 是城市可持续发展的重要保障^[1]。作为城市重要公共资源, 绿色空间的公平配置长期备受关注^[2], 其衡量标准也由早期对地域配建指标数量的均等性转变为当前对于实际可达绿色空间的均衡性。绿地可达性模型(含缓冲区^[3]、成本耗费^[4]、引力^[5]、两步移动搜索^[6]等模型)开始被广泛用于测度不同地段(或群体)实际获取的绿色空间机会或规模。为了对绿色空间可达机会、规模等公平性展开分析比较, 经济学中的基尼系数、洛伦兹曲线^[7]等指标被相继引入绿色空间研究中, 它从总体层面描述和量化一个城市或区域范围内绿色空间可达公平性的总体水平^[8]; 在单体层面, 以区位熵为代表的相关指数也开始被大量应用, 用以衡量和比较单元在区域中获取特定资源的地位^[9]。

但因传统研究中的衡量对象多为二维空间, 衡量结果虽在一定程度上能反映不同地段(或群体)绿色空间可达机会或规模的差异, 但却难以准确体现其实际获取的绿色空间服务水平。而既有研究表明, 与二维面积相比, 绿色空间三维绿量与它的游憩和生态服务绩效有着更为密切的关联性, 其指标值也更加接近绿色空间的实际服务水平, 因而能有效提升“公平性”测度的客观性和实效性。但依托传统的现场调查测量法来衡

量绿色空间三维绿量存在较大的时空局限性且需耗费大量的人力、物力和财力, 难以在大范围应用, 这也长期阻碍了城市层面三维绿量公平性研究的开展。

高分辨率卫星遥感影像、航空摄影测量和机载激光扫描等数据采集工具为高效精准测量三维绿量创造了条件。其中, 杨鑫等基于高清遥感影像, 应用机器学习反演推导三维绿量, 计算了北京中心城区碳储量数值^[10]; 朱启梦等利用倾斜摄影技术对三维绿量进行量化分析, 对比了不同三维绿量计算方法的精度^[11]; Skoczylas等则利用机载激光扫描技术生成的点云数据, 精确提取植被体积, 计算植被三维密度与体积^[12]。而人工智能分析技术的发展和应用则为突破传统调查衡量法的技术瓶颈以及测量数据的精度优化和保障奠定了基础。如Chen等基于遥感影像构建随机森林与梯度提升回归模型, 利用景观指数与植被指数预测地表温度^[13]; Adak等利用遥感影像, 结合经典线性回归与机器学习(岭回归、Lasso回归)对农作物产量进行预测^[14]; 周聪惠等将机器学习与深度学习技术结合用以识别城市绿色空间的结构类型, 并对城市绿色空间时空演变展开深入分析^[15]。两者的结合应用将让大范围、多时段、高精度推算城市绿色空间的三维绿量成为可能。

在此基础上, 本研究将高精度遥感影像数据

与人工智能技术结合, 测度细粒度空间单元的三维绿量, 以南京主城区为研究区域, 研究不同地段三维绿量可达公平性演进特征, 对比二维绿斑可达公平性水平以展现三维绿量可达公平性测度和应用的特征及优势, 为城市绿色空间服务评估方法的改良提供些许有益借鉴。

1 研究方法

1.1 研究区域与路径框架

1.1.1 研究区域

南京市主城区总面积为278 km², 居住着全市50%以上的人口(465.99万人), 平均人口密度超过1.5万人/km², 老城区部分街区密度超过4万人/km², 属于典型的高密度城区^[16]。截至2024年初, 南京市建成区绿化覆盖率达44.96%, 绿地率达40.82%^[17], 但较高的人口密度和人口的不均匀分布导致绿色空间分配始终处于不平衡状态, 绿色空间可达公平性优化成为规划工作重点。

根据南京市发展脉络和相关数据的获取条件, 选取1990—2020年为研究总时段, 以10年为间隔将研究时段分为阶段一(1990—2000年)、阶段二(2000—2010年)、阶段三(2010—2020年)3个演进阶段展开研究。其中, 阶段一可被视为快速城市扩张的起步期, 在该阶段新城

区、新兴产业园区、居住区建设开始快速起步，城市间扩张开始提速；阶段二是城市快速扩张阶段，在该阶段建成区以老城区为核心快速向外围拓展蔓延，主城区内开发强度提升，且密度日益提升；在阶段三建设用地增速开始大幅放缓，城市发展重心由增量扩张逐步转为存量优化，城市更新、旧城改造等成为发展重心。依此得到4个研究目标年份，分别为1990、2000、2010和2020年。

鉴于高密度城市干道间距大多介于400~600 m(中值500 m)，且居民5分钟生活圈的服务半径一般约为250 m(直径约为500 m)，故选取500 m边长的网格作为基本研究单元。该单元尺度与《城市居住区规划设计标准》(GB 50180—2018)中“5分钟生活圈居住区”尺度基本一致，不仅能密切贴合居民日常生活高频访问的绿色空间范围，同时在高密度城市中也具有较高代表性。同时，采用尺度统一的单元网格作为本研究的基本单元也便于机器学习模型应用和公平性比较。依此在主城区共获得1 095个研究单元(图1)，其中内部有居住用地的单元为可达公平性研究有效单元。

1.1.2 路径框架

整个研究可分为二维绿斑提取、三维绿量测算、三维绿量可达公平性衡量、公平性演进特征分析4个环节。研究首先基于高精度遥感数据，应用支持向量机来对绿色空间进行精细化提取。其次，通过现场实测获得样地三维绿量数据，并选取代表性的植被指数构建随机森林回归模型，反演测算研究单元的三维绿量数据。在此基础上，依托高斯两步移动搜索法，获得研究单元的可达三维绿量。最后，通过测算目标年份所有单元可达三维绿量的基尼系数和各个单元可达三维绿量的区位熵指标，分别从总体和单元2个层面对可达公平性水平及其演进特征进行了量化评估。同时，通过将三维绿量和二维绿斑可达公平性相关指标进行对比，展现三维绿量可达公平性测度和应用的特征。

1.2 研究方法

1.2.1 二维绿斑提取

研究采用支持向量机分类方法对1990—2020年4个时间点的遥感影像进行提取分类，其中二维绿斑包括乔木覆盖土地与灌草覆盖土地，其用地类型包括城市内公园绿地、防护绿地、郊



图1 南京主城区研究范围示意图[底图引自自然资源部标准地图服务网站，审图号：GS(2024)0650号]
图2 样地分布情况(2-1 样地位置分布情况；2-2 样地绿地类型情况；2-3 样地群落构成情况)

野绿地、耕地、园地等。对遥感影像预处理后，利用ENVI工具先后进行训练样本选择、样本精确性评价、SVM监督分类、分类后精度检验，最后将数据转换为矢量格式文件，导入ArcGIS软件中进行绘图，作为后期分析的二维绿斑基础数据库。

1.2.2 三维绿量测算

三维绿量界定分为“体积学说派”^[18]“叶面积学说派”^[19]和多指标复合模型测算^[20]等方向，本文采用“体积学说派”的观点，即植被茎叶在空间中占据的体积，以三维空间体积为基础来定义三维绿量。根据现有研究和实践，三维绿量测算方法可分为立体摄影测量法、三维激光扫描法、以平面量模拟立体量法、以立体量推算立体量法4类^[21]。其中，立体摄影测量法目前大多依托倾斜摄影技术开展，虽能展开大范围数据采集，但该方法在实际应用中受到天气条件、植被密集程度及建模算法精度制约，精准性在不同区域存在较大波动^[22]；三维激光扫描法多基于LiDAR技术展开，并在单株植被的三维绿量测量展现出较高精度^[23]，但其数据处理过程的复杂性与高昂成本限制了该技术在在大尺度空间的广泛应用；以平面量模拟立体量法，则是基于二维图像信息对三维绿量进行估算^[24]，方法简便却精度有限，因此也很难大范围推广；以立体量推算立体量法，主要通过局部区域的立体量测量与统计学或数学模型的结合，有效推算出整体区域的立体量信息^[25]。综合分析各技术优劣特征并结合考量本研究的基础条件和目标，以立体量推算立体量法能在精度、覆盖范围与测量效率三者之间实现较好平衡，并能为机器学习技术和统计验证提

供有效接口，因此将其作为本研究的基础测量方法，并对其进行创新性拓展。基本思路为运用体积法获取三维绿量数据，通过构建样地三维绿量与植被指数数据的随机森林反演模型，利用区域内植被指数数据反演得到整个研究区域的三维绿量分布。

在三维绿量^[26]及生物量反演^[27]研究中，通常会选择RVI、SAVI、NDVI等多种植被指数依次建立回归模型。在本研究中，利用 R^2 和F统计量，对已有的回归模型进行筛选^[28]，旨在识别并选取对模型预测结果贡献最为显著，即预测效能最优的6种植被指数(表1)，作为本研究模型建立的特征数据。选取分辨率为30 m的Landsat系列遥感影像数据进行植被指数提取，在Google Earth Engine(GEE)平台上，采用年度最大合成法，选择遥感影像时间序列中具有最强信号的影像进行植被指数合成与输出，并导入ArcGIS软件中进行投影坐标系校准，最终获取南京主城区4个目标年份的6种植被指数栅格数据，作为后期三维绿量反演模型建立的特征数据。

为使所有样地均有对应的植被指数数据，样地大小需要大于等于像元大小。与植被指数空间分辨率一致，本研究选择的样地大小也为30 m×30 m。研究从地域、群落结构、所属用地、采样时间4个方面确保选择样地的代表性和全面性，以充分保障研究结果的可靠性。其中，为确保地域代表性，样地选择的区域均衡分布于南京市主城区的六大辖区(图2-1)；为确保植被群落结构代表性和全面性，样地均衡覆盖乔灌木、乔木、乔木3种群落结构类型(图2-2)；在用途上，南京主城区绿色空间较多集中在公园绿

地中,并广泛存在于居住区、商业区及公共设施相关用地附属绿地,故在样地选择上,适当加大了公园绿地样地份额,并均衡纳入居住区、商业区及公共设施等附属绿地(图2-3);在采样时间上,样地植被信息主要采集于9月,主要原因是该时期植被繁茂且三维绿量水平较稳定,为全年中评估三维绿量的理想时段。在已有的三维绿量回归模型建立和应用研究^[28]中,为保障样本量充足和回归结果可靠性,回归模型样本数量一般为变量数目的15~20倍。因此,结合本研究变量数目和样地实际条件,最终确定回归模型的样本数量为212个,为变量数目35倍,远超模型建立的门槛要求。应用ArcGIS软件,利用两步路App和手持GPS对样地的中心点和4个角点进行定位。三维绿量计算方式为:乔木与部分灌木选取与树种树冠形状相似的立体几何体,根据体积计算公式求得树冠体积,即三维绿量结果;部分灌木与草本采用覆盖面积与株高的乘积作为结果。因此,调查内容包含:样地内乔木的数量、种类、株高、枝下高、冠幅等;灌木的数量、种类、冠幅、覆盖面积、株高等;草本的覆盖面积与株高。

首先,将调研数据与植被指数进行匹配,构建模型的目标数据与特征数据集,从而形成完整的样本数据集。其次,采用随机抽样法,按照4:1进行训练数据集和验证数据集分配,利用KFold方法进行交叉验证,以确保模型训练与验证的准确性与有效性。用R-Studio软件和样本数据,展开三维绿量回归建模训练,并在模型优化阶段通过网格搜索法系统遍历并优化决策树的数目、最大深度等关键参数,旨在发现参数网格内的最优配置,使模型展现出最佳预测性能。研究初期共选取随机森林回归、梯度提升回归、自适应增强回归、岭回归、Lasso回归5种模型进行训练建模,应用决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和平均绝对误差(MAE)等指标对5种模型精度和可靠性进行对比,选取表现最优模型作为研究应用模型。最后,利用训练完成的模型,结合遥感影像获取的植被指数对各时段研究单元的三维绿量进行反演测算。为验证模型反演结果的准确性,用模型反演出未参与模型构建的样地的三维绿量数据,并将反演结果与这些样地实际测量的三维绿量数据进行对比分析,基于决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和平均绝对误差(MAE)3类分析指标,进一步验证模型可靠性与

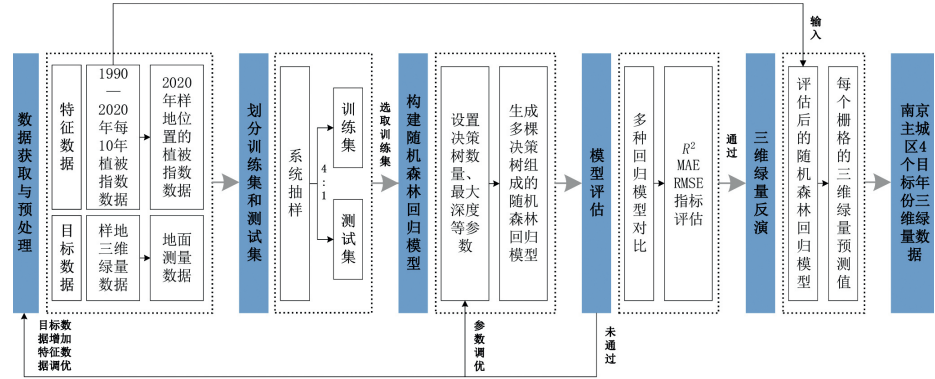


图3 南京主城区三维绿量随机森林回归反演流程图

精度。处理流程详见图3。

1.2.3 三维绿量可达性衡量

本研究通过高斯两步移动搜索法(GA2SFCA)计算不同研究单元的绿量可达性。先以绿量所在网格的质心作为供给点 j ,以15分钟生活圈范围(步行速度1.2 m/s^[29],1 080 m为半径)为搜索距离阈值 d_0 ,汇总搜索域内所有网格的人口数量 D_k ,利用高斯函数按照距离衰减规律赋以权重,并对加权后的人口进行加和汇总,计算供需比 R_j 。计算公式如下:

$$R_j = \frac{S_j}{\sum_{k \in (d_{kj} \leq d_0)} G(d_{kj}, d_0) D_k}, \quad G(d_{kj}, d_0) = \frac{e^{-\frac{1}{2}(\frac{d_{kj}}{d_0})^2} - e^{-\frac{1}{2}}}{1 - e^{-\frac{1}{2}}}$$

式中: R_j 为供需比; $G(d_{kj}, d_0)$ 为距离衰减函数; S_j 为绿量的总供给; d_{kj} 为需求点与供给点之间的距离; d_0 为设定的搜索距离阈值; D_k 为搜索范围内人口数量。

接着以居民所在网格的质心作为需求点 i ,以同样范围建立搜索域 d_0 ,将绿量的供需比 R_j 在高斯衰减函数的基础上汇总求和,得到需求点 i 的基于衰减函数的绿量可达性 A_{if} 。计算公式如下:

$$A_{if} = \sum_{l \in (d_{il} \leq d_0)} G(d_{il}, d_0) R_j$$

式中: A_{if} 为绿量可达性; R_j 为供需比; d_{il} 为需求点与供给点之间的距离; d_0 为设定的搜索距离阈值; $G(d_{il}, d_0)$ 为与第一步相同的距离衰减函数。

最终得到4个目标年份居民网格单元的可达绿量数据,同时应用相同方法获得居民网格单元的可达绿斑数据作为对照,3个阶段研究有效单元数量分别为611、761、810个。

1.2.4 三维绿量可达公平性演进

基于研究单元的可达绿量测算结果,本研究利用基尼系数衡量南京主城区总体层面绿量可达公平性,利用区位熵衡量单元层面的绿量可达公

平性。

在主城区总体层面,利用R-Studio软件,输入不同目标年份各个单元的可达绿量与人口数据,计算得到南京主城区4个目标年份的洛伦兹曲线和基尼系数,计算公式如下:

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

式中: G 为基尼系数,值域为[0, 1]; i 为第 i 个单元,值域为[1, n]; P_i 为第 i 个单元居民人口变量的累积比例,值域为[0, 1]; S_i 为第 i 个单元可达绿量变量的累积比例,值域为[0, 1]。根据国际通用的基尼系数评价标准,基尼系数在0.2以下为资源分配绝对公平,0.2~0.3为比较公平,0.3~0.4为相对公平,0.4~0.5为差距过大,高于0.5为差距悬殊。

在单元层面,研究单元的区位熵计算公式如下:

$$Q_i = \frac{q_i/p_i}{q/p}$$

式中: Q_i 为单元可达绿量的区位熵; q_i 为单元 i 可达绿量值; p_i 为单元 i 的居民规模; q 为研究范围内可达绿量总值; p 为研究范围内的居民总数。当区位熵小于1时,表明该单元绿量可达公平性水平低于研究范围的平均水平,处于劣势地位,数值越低,劣势越大;反之表明该单元绿量可达公平性高于研究范围的平均水平,处于优势地位,数值越高,优势越大。

2 结果与分析

2.1 二维绿斑提取结果

二维绿斑提取结果显示(图4),南京主城区二维绿斑面积呈现先快速缩减、后缓慢增长的趋势。其中,主城区边界地段绿斑面积变化波动较

大, 前2个阶段缩减明显, 最后一个阶段相对稳定, 并有小幅上升; 中部区域绿斑变化幅度则并不明显, 总量相对稳定。

2.2 三维绿量测算结果

2.2.1 三维绿量反演模型评估与对比

5种回归模型的评估结果显示(表2), 模型拟合程度均达到回归预测的一般标准(R^2 高于0.7)。综合比较 R^2 、RMSE、MAE 3个指标值(R^2 越高、RMSE与MAE越低, 则模型预测能力越强), 随机森林回归模型综合表现要明显优于其他4类回归模型, 故选为本研究三维绿量反演模型。将各个年份研究单元的植被指数作为模型特征数据输入训练好的随机森林回归模型中, 预测反演出各个年份对应单元的三维绿量数据(图5)。将22个未参与模型构建样地的三维绿量模型反演数据与实际测量数据对比, R^2 、MAE、RMSE 3类指标结果分别为: 0.702、301.253、402.237, 进一步显示模型具有较高可靠性与精度。

2.2.2 三维绿量演进分析

统计结果显示, 南京主城区整体绿量呈先缩减、后升高的态势(图6)。其中, 整体绿量在阶段一大幅下降(-26.68%), 阶段二降幅缩窄(-17.30%), 阶段三开始小幅回升(2.19%)。每个阶段的变化方向虽与二维绿斑总体一致, 但在趋势特征上两者却存在明显差异。其中, 绿斑在前2个阶段降幅呈现上升趋势, 而在第三个阶段的增幅也较之三维绿量更加显著。

2.3 三维绿量可达性衡量结果

基于高斯两步移动搜索法的可达绿量测度结果显示(图7、8), 南京主城区可达绿量总体水平呈现先减后增再减的波动趋势, 3个阶段变化幅度均超过8%, 且幅度越来越大。与可达绿斑总体水平变化趋势相比, 第一阶段两者呈现相反趋势变化, 第二阶段和第三阶段两者变化方向虽相同, 但可达绿斑变化幅度要明显低于可达绿量。

2.4 三维绿量可达公平性演进特征分析

2.4.1 整体层面

在整体层面, 南京主城区4个目标年份的可达绿量基尼系数分别为0.53(差距悬殊)、0.47(差距过大)、0.48(差距过大)和0.51(差距悬殊), 绿色资源分配不公平状况十分突出(图9)。与之对比, 可达绿斑的基尼系数虽略低于同一年份可达绿量基尼系数, 但指标值仍未低于0.43。两者变

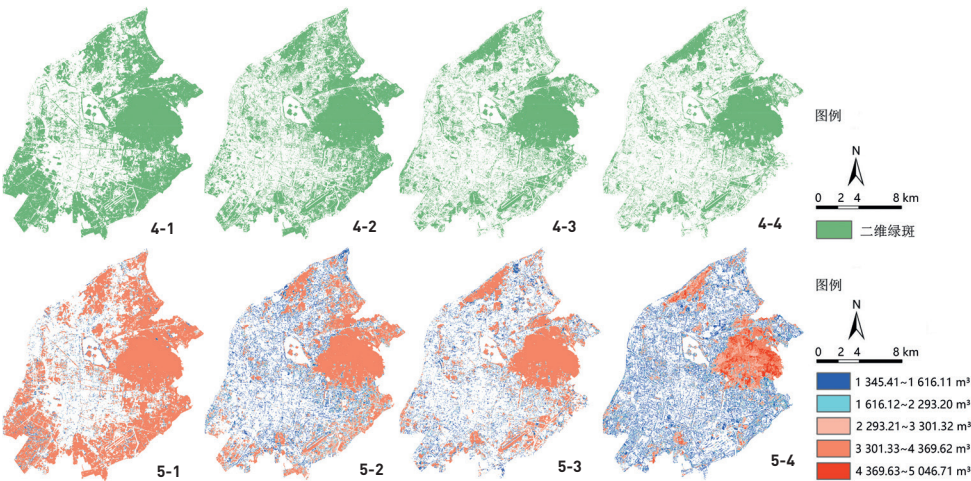


图4 南京主城区二维绿斑分布图(4-1~4-4分别指1990、2000、2010和2020年的二维绿斑)
图5 南京主城区三维绿量分布图(5-1~5-4分别指1990、2000、2010和2020年的三维绿量)

化趋势也基本一致, 呈现第一阶段下降、第二阶段稳定、第三阶段上升的特征。

2.4.2 单元层面

区位熵测算结果显示, 4个年份绿量可达公平性占劣势的单元均集中在主城区中、西部等人口密集区域; 绿量可达公平性优势单元则集中分布在主城区外围, 包含北部、西南部、东部及东南部边界地段。综观3个阶段变化趋势, 劣势单元集中区域由初始的中西部向东北与西南2个方向延伸, 优势单元集中区域由东北部面状分布, 转变为外围带状分布(图10)。

对比可达绿量和可达绿斑区位熵可以发现, 两者优势和劣势单元在4个年份的分布特征总体

一致, 但在主城区北部和东部边界地段, 同一单元绿量可达公平性的优势水平大多要高于绿斑可达公平性, 而在东北、东南和西南的大片地段同一单元绿斑可达公平性的优势水平更加明显。

3 讨论与启示

3.1 三维绿量的演进特征

通过对南京主城区4个目标年份、3个阶段的三维绿量演进特征研究, 发现三维绿量的演进特征较之二维绿斑更加复杂, 其在绿色空间下降时呈现急剧性, 但在绿色空间增长时却呈现滞后性。对照绿量和绿斑的时空数据可以发现, 导致该现象的主因在于植物生长自然周期对于三维绿

表1 6种植被指数名称与特性

植被指数名称	选取理由
归一化植被指数(NDVI)	目前应用最广泛的植被指数之一, 其计算简单、易于理解, 且对植被覆盖度具有较好的敏感性, 适用于大范围的植被监测和评估
比值植被指数(RVI)	直接反映植被的生长状况, 对高覆盖度的植被具有较强的敏感性, 在高覆盖度区域, 其表现优于其他植被指数
差值植被指数(DVI)	能够突出植被与土壤的差异, 有助于区分植被与非植被区域, 适用于植被覆盖度较低或土壤背景复杂的地区
土壤调节植被指数(SAVI)	能够更好地适应不同土壤类型和湿度的条件, 提高植被信息提取的准确性, 特别适用于土壤背景变化较大的地区
增强型植被指数(EVI)	能够更好地消除大气散射和冠层背景的影响, 适用于高海拔、高纬度或大气条件复杂的地区, 提高了植被监测的准确性和可靠性
绿色归一化植被指数(GNDVI)	能够突出绿色植被的信息, 有助于识别绿色植被的类型和分布, 特别适用于城市绿化、农田管理等对绿色植被有特定需求的领域

表2 不同回归模型评估结果对比表

指标	随机森林	梯度提升	自适应增强	岭回归	lasso回归
R^2	0.843	0.823	0.815	0.730	0.866
MAE	157.099	170.003	223.269	283.666	215.490
RMSE	337.571	376.852	391.349	398.972	349.735

量的影响要远大于二维绿斑。例如,阶段一建设用地的快速扩张导致外围具有高绿量的绿斑大幅减少,直接造成绿量总体降幅要显著高于绿斑总体降幅;第二阶段的用地扩张虽也导致绿斑总量下降,但由于该部分绿斑大多位于城市内部且绿量水平不高,因此绿量降幅反而低于绿斑降幅;而第三阶段城市更新过程中的绿色空间增补,推动了绿斑数量和面积的快速回升,但由于该部分单元内大部分为新栽种植物,故对于三维绿量增长的贡献度非常有限。

三维绿量相关变化特征表明,在城镇化进程中如要避免三维绿量总体水平的剧烈波动,应对具有良好植被水平的绿色空间进行重点保护和管制,从而能在城市扩张进程中绿斑规模缩减的同时,降低绿量流失速度。这也将有助于维持城镇化进程中的环境基本质量,并大幅缩短城市绿色空间资源的恢复周期。

3.2 三维绿量可达公平性时空特征

因城镇化进程中单元居民规模变化,可达绿量变化较其总量变化更为复杂。第一阶段,在高绿量绿色空间被侵占的同时,居住区及其周边的绿斑总数有所上升,但由于其绿量增至稳定状态需较长时间,居民可达绿量仍呈减少趋势;第二阶段,伴随植物生长,绿量开始快速回升,居民可达绿量增幅也开始超过可达绿斑增幅;第三阶段,主城区内绿斑和绿量水平开始趋于稳定,但由于该阶段城区居民规模增幅显著超越绿色空间增幅,使得可达绿量与可达绿斑均呈下降趋势。

在整体层面,南京主城区4个目标年份的可达绿量与可达绿斑基尼系数均高于0.4,且总体呈上升趋势,表明绿色空间资源分配不均问题普遍存在。同时,同一年份三维绿量基尼系数均要高于二维绿斑,说明在无外部干预情境下,二维绿斑分布不均将加剧三维绿量分配失衡。而在单元层面可以发现,主城区边缘地段因城镇化进程相对缓慢,大量原有绿色空间得以保留,该类地段通常植被茂密,使其周边单元居民的绿量可达公平性大多处于显著优势地位,且较之绿斑可达公平性的优势地位更加显著。与之相反的是,主城区中西部区域由于较高的开发建设强度,导致绿色空间严重不足,同时居民快速增长也进一步加剧绿量可达公平性的下降,致使该区域绿量可达公平性长期处于劣势地位。同时,由于该地段多为新建绿地或绿色开放游憩空间,其绿量水平

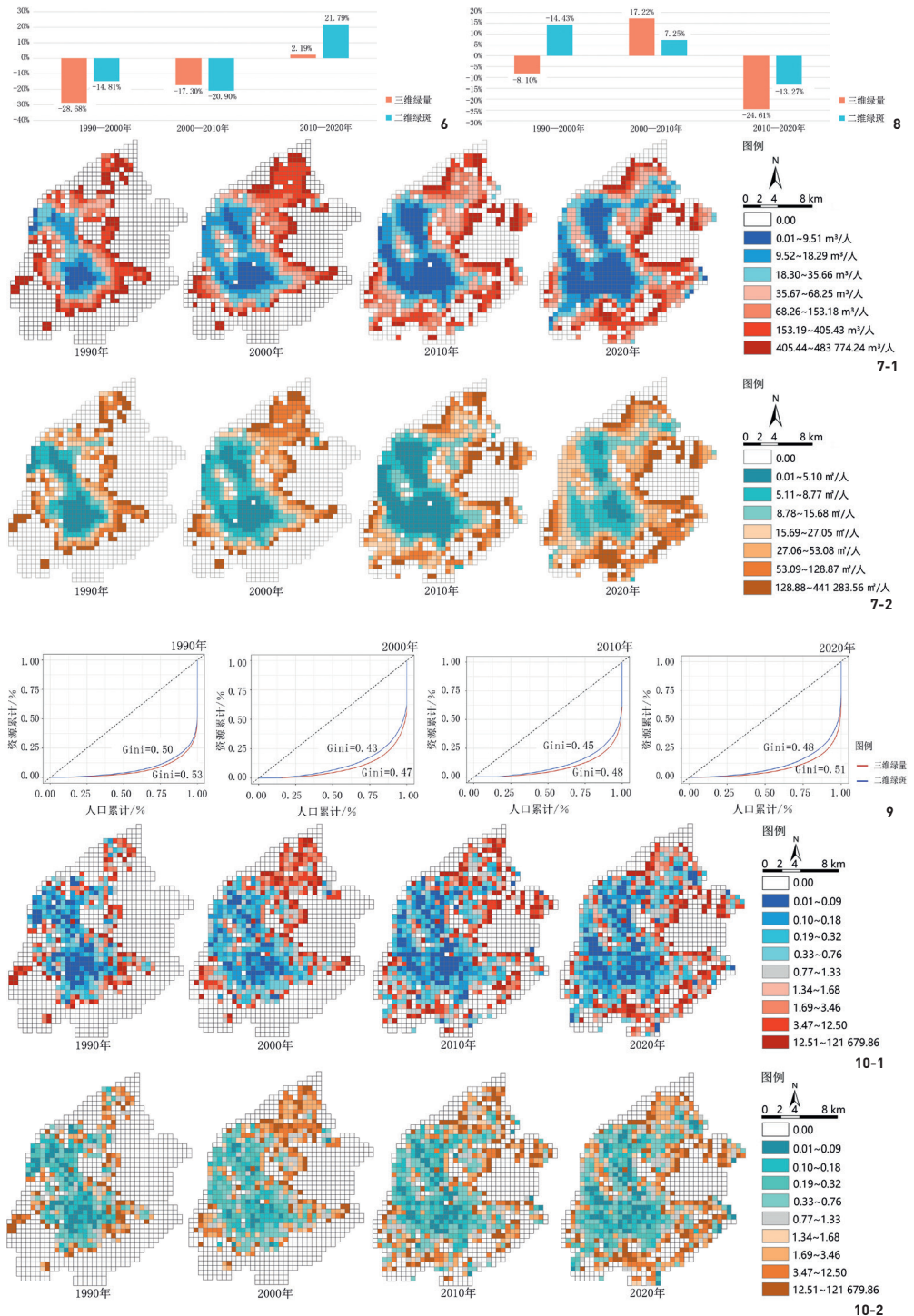


图6 南京主城区1990—2020年三维绿量和二维绿斑整体变化幅度

图7 南京主城区4个研究目标年份可达绿量与可达绿斑分布图(7-1和7-2分别指可达绿量和可达绿斑)

图8 南京主城区1990—2020年可达绿量和可达绿斑变化幅度

图9 南京主城区1990—2020年可达绿量与可达绿斑洛伦兹曲线图

图10 南京主城区1990—2020年可达绿量与可达绿斑区位熵分布图(10-1和10-2分别指可达绿量和可达绿斑)

通常大幅低于外围地段,并导致居民绿量可达公平性劣势水平要明显低于绿斑可达公平性。

3.3 绿量可达公平性的优化策略

鉴于南京主城区当前可达绿量资源分配不均问题较之二维绿斑更为突出,绿色空间规划亟须摒弃仅追求二维绿斑规模增长的传统思维模式,

并聚焦于三维绿量与二维绿斑的协同提升。上述研究表明,绿斑分布、植被状态和人口密度的差异都将导致可达绿量的不公平。但在当前城市更新和存量规划背景下,要大幅增补绿斑面积或调整人口密度难度较大,依托城市既有开放空间来提升绿量可达公平性成为可行性最高的措施。

三维绿量与二维绿斑在时空演进上虽趋势方向相似，但特征差异显著，特别是近年来三维绿量增长显著滞后于二维绿斑，凸显其提升之难。鉴于此，在规划层面上针对高密度区域可达绿量的有效调控，改良现行二维主导的规划调控手段已刻不容缓。其中，对绿色空间的常规规划调控多集中在二维层面，难以对三维绿量做出有效干预。如能在规划编制中置入三维绿量调控指标，如人均绿量、绿色空间容积率等，则能对城市绿色资源展开更加精准和细致的管理和分配，推动将传统的二维用地单一调控模式转变为二维用地与三维绿量协同调控模式。

同时，三维绿量变化的动态性及其与二维绿斑变化的差异性要求将传统规划中以固化蓝图为导向的“静态”调控思维转变为以动态过程为导向的“动态”调控思维。这要求规划师和管理者能够精准把控所在地域的植被生长规律和服务机制，制定动态化、长效化的绿量时空调控目标，并结合不同时空情境下的生态环境、社会经济发展等多重因素订立具有高度适配性的调控策略。

4 结束语

传统绿色空间公平性研究大多聚焦于可达绿斑面积，难以准确反映实际绿色资源分配和占有情况。而随着我国开始转变城市发展模式、提升城市发展质量，绿色空间发展导向开始由“配建指标”转向“服务绩效”，对绿色空间配置公平性进行多维度评测成为迫切需求。本研究基于样地调查和植被指数筛选建立起具有较高精度水平的随机森林回归预测模型，用以在城市层面开展大范围、高精度的三维绿量反演测算。该方法突破了传统现场调查法的时空局限，为高效衡量绿色空间资源的实际分配结构及其时空变化规律提供了有效工具。研究显示，与二维绿斑相比，三维绿量演进过程存在显著差异，该差异在绿色空间规模剧烈波动时尤为突出。这也直接导致绿量可达公平性的演进过程较之绿斑可达公平性更加复杂。该研究结果能为绿色空间规划决策的合理制定提供综合保障，同时也为绿色空间规划编制手段和过程的改良提供些许新思路。受限于数据类型和精度，本研究仅在空间层面讨论三维绿量演进公平性问题，随着数据精细化和可及性程度不断提升，后续研究还可围绕社会层

面不同群体三维绿量获取公平性展开深入细致的探讨。

注：文中图片除注明外，均由作者绘制。

参考文献：

[1] 韩军, 李乐, 王思滢. 基于生态效应的城市绿色空间体系构建: 以西安国际港务区绿带公园为例[J]. 中国园林, 2023, 39(S2): 37-40.
HAN J, LI L, WANG S Y. Construction of Urban Green Space System Based on Ecological Effects: Taking the Green Belt Park of Xi'an International Trade & Logistics Park as an Example[J]. Chinese Landscape Architecture, 2023, 39(S2): 37-40.

[2] 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.
ZHOU C H. Research on the Evolution of the Connotation of "Equity" and Its Measurement Standards in Park Land Planning[J]. Chinese Landscape Architecture, 2020, 36(12): 52-56.

[3] NICHOLLS S. Measuring the accessibility and equity of public parks: a case study using GIS[J]. Managing Leisure, 2001, 6(4): 201-219.

[4] KONG F, YIN H, NAKAGOSHI N. Using GIS and landscape metrics in the hedonic price modeling of the amenity value of urban green space: A case study in Jinan City, China[J]. Landscape and urban planning, 2007, 79(3/4): 240-252.

[5] VEAL A J, PIRACHA A. Meeting the need for a rational basis for open space and recreation planning in new high density residential areas: the Recreational Activity Benchmark model[J]. Australian Planner, 2022, 58(1/2): 63-68.

[6] KOCATEPE A, ULAK M B, OZGUVEN E E, et al. Socioeconomic characteristics and crash injury exposure: A case study in Florida using two-step floating catchment area method[J]. Applied Geography, 2017, 87: 207-221.

[7] XU C, HAASE D, PRIBADI D O, et al. Spatial variation of green space equity and its relation with urban dynamics: A case study in the region of Munich[J]. Ecological Indicators, 2018, 93: 512-523.

[8] LI S, ZENG X, ZHANG X, et al. Spatial Justice of Urban Park Green Space under Multiple Travel Modes and at Multiple Scales: A Case Study of Qingdao City Center[J]. Sustainability, 2024, 16(4): 1428.

[9] DONG Y, CHEN X, LV D, et al. Evaluation of Urban Green Space Supply and Demand Based on Mobile Signal Data: Taking the Central Area of Shenyang City as an Example[J]. Land, 2023, 12(9): 1742.

[10] 杨鑫, 高雯雯, 李莎, 等. 基于遥感影像估算的北京中心城区碳储量与气候环境关联性研究[J]. 风景园林, 2022, 29(5): 31-37.
YANG X, GAO W W, LI S, et al. Research on Correlation Between Carbon Storage Estimation Based on RemoteSensing Image and Climate Environment in Central Urban Area of Beijing[J]. Landscape Architecture, 2022, 29(5): 31-37.

[11] 朱启梦, 孙金华, 杨柳, 等. 基于无人机倾斜摄影的三维绿量估算[J]. 河南科学, 2024, 42(5): 694-704.

ZHU Q M, SUN J H, YANG L, et al. Three-dimensional Green Quantity Estimation Based on UAV Oblique Photography[J]. Henan Sciences, 2024, 42(5): 694-704.

[12] ZIEBA-KULAWIK K, SKOCZYLAS K, WEZYK P, et al. Monitoring of urban forests using 3D spatial indices based on LiDAR point clouds and voxel approach[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 65: 127324.

[13] CHEN D, ZHANG F, ZHANG M, et al. Landscape and vegetation traits of urban green space can predict local surface temperature[J]. Science of The Total Environment, 2022, 825: 154006.

[14] ADAK A, MURRAY S C, BOZINOVIC S, et al. Temporal Vegetation Indices and Plant Height from Remotely Sensed Imagery Can Predict Grain Yield and Flowering Time Breeding Value in Maize via Machine Learning Regression[J]. Remote Sensing, 2021, 13(11): 2141.

[15] ZHOU C, ZHANG S, LIU B, et al. Using deep learning to unravel the structural evolution of block-scale green spaces in urban renewal[J]. Cities, 2024, 150: 105030.

[16] ZHOU C, AN Y, ZHAO J, et al. How do mini-parks serve in groups? A visit analysis of mini-park groups in the neighbourhoods of Nanjing[J]. Cities, 2022, 129: 103804.

[17] 吴春霞. “绿值”提升“植”抵人心[N]. 南京日报, 2024-03-12(A06).
WU C X. "Green Value" Enhances the "Planting" to Win People's Hearts[N]. Beijing Daily, 2024-03-12(A06).

[18] 周坚华. 城市绿量测算模式及信息系统[J]. 地理学报, 2001(1): 14-23.
ZHOU J H. Theory and Practice on Database of Three-dimensional Vegetation Quantity[J]. Acta Geographica Sinica, 2001(1): 14-23.

[19] 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.
ZHOU J H, SUN T Z. Study on Remote Sensing Model of Three-Dimensional Green Biomass and the Estimation of Environmental Benefits of Greenery[J]. National Remote Sensing Bulletin, 1995(3): 162-174.

[20] 刘常富, 何兴元, 陈玮, 等. 沈阳城市森林三维绿量模拟及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2008(6): 1173-1178.
LIU C F, HE X Y, CHEN W, et al. Simulation of Three-Dimensional Green Volume of Urban Forests in Shenyang and Analysis of Its Influencing Factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008(6): 1173-1178.

[21] 陈自新, 刘少宗, 古润泽. 北京城市园林绿化生态效益的研究(6)[J]. 中国园林, 1998, 14(6): 53-56.
CHEN Z X, LIU S Z, GU R Z. Research on the Ecological Benefits of Urban Landscaping and Greening in Beijing (6)[J]. Chinese Landscape Architecture, 1998, 14(6): 53-56.

[22] GONG Q. A study of using DInSAR+oblique photography in the deformation measurement[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2020, 29(6): 37-43.

[23] 李肖肖, 唐丽玉, 黄洪宇, 等. 基于点云数据的单木三维绿量估算方法[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(5): 1119-1127.

LI X X, TANG L Y, HUANG H Y, et al. A Method for Estimating Living Vegetation Volume of Urban Trees based on Point Cloud Data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(5): 1119–1127.

[24] 陈宇, 童俊. 武汉市东湖风景区名胜区绿量格局研究[J]. 中国园林, 2015, 31(9): 27–30.

CHEN Y, TONG J. Research on the Green Volume of East Lake Famous Scenic Site of Wuhan[J]. Chinese Landscape Architecture, 2015, 31(9): 27–30.

[25] 郑俊鸣, 朱丹丹, 蒋梦莹, 等. 福州市3个山地公园三维绿量与其影响因子特征研究[J]. 中国园林, 2018, 34(2): 89–93.

ZHENG J M, ZHU D D, JIANG M Y, et al. Tridimensional Green Biomass and Its Impact Factors of Three Mountain Parks in Fuzhou[J]. Chinese Landscape Architecture, 2018, 34(2): 89–93.

[26] HOUBORG R, MCCABE M F. A hybrid training approach for leaf area index estimation via Cubist and random forests machine-learning[J]. Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018, 135: 173–188.

[27] YUE J, YANG G, LI C, et al. Estimation of Winter Wheat Above-Ground Biomass Using Unmanned Aerial Vehicle-Based Snapshot Hyperspectral Sensor and Crop Height Improved Models[J]. Remote Sensing, 2017, 9(7): 708.

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

YAO C H, LI D X. Study on the Green Volume Ratio (GVR) and Its Calculating Mechanism[J]. Chinese Landscape Architecture, 2015, 31(9): 5–11.

[29] FITZPATRICK K, BREWER M, TURNER S, et al. Another look at pedestrian walking speed[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2006(1): 21–29.

(编辑/王媛媛)

作者简介:

周聪惠

1982年生/男/湖南长沙人/博士/东南大学建筑学院教授, 博士生导师/国家注册城乡规划师/研究方向为风景园林规划设计理论与方法(南京 210096)

宗媛

1999年生/女/浙江金华人/东南大学建筑学院硕士/研究方向为智能化景观规划设计方法(南京 210096)

Research on the Evolution of Accessible Equality of Three-dimensional Green Volume Based on Machine Learning

ZHOU Conghui, ZONG Yuan

Abstract: Conventional metrics for evaluating equality in urban green space planning, primarily based on two-dimensional green space (2DGS) area coverage, are insufficient for characterizing the intricate distribution of green resources in three-dimensional space. These traditional measures overlook the substantial contributions of vertical vegetation structures, such as trees and shrubs, to urban ecological health, biodiversity, and aesthetic quality, potentially leading to suboptimal planning outcomes. To address this gap, this study establishes a novel analytical framework that synergizes high-precision remote sensing with advanced machine learning to enable a precise and comprehensive assessment of equality in three-dimensional green volume (3DGV) allocation, thereby supporting more integrated and effective urban green planning. The framework was implemented in the main city of Nanjing through four sequential stages: 1) 2DGS Extraction: Precise delineation of surface green coverage was achieved by applying a Support Vector Machine (SVM) classifier to high-resolution remote sensing imagery, generating an accurate foundational map for spatial analysis. 2) 3DGV Modeling and Calculation: A robust Random Forest regression model was developed to estimate 3DGV across the entire study area. This model was trained using detailed field-measured 3DGV data from sample plots and a suite of spectral vegetation indices derived from satellite data, effectively capturing non-linear relationships to ensure reliable volume inversion. 3) Accessibility-Based Equity Measurement: The equity of access to green resources was evaluated using the Two-Step Floating Catchment Area (2SFCA)

method. This approach calculated the accessible 3DGV for each residential community by balancing the spatial supply of green volume with local population demand, highlighting fine-grained spatial disparities in availability. 4) Comparative Equity Analysis: The overall equity level was quantified using the Gini coefficient for accessible 3DGV, while the location quotient identified units with relative surplus or deficit. A direct comparison of equity indicators derived from 3DGV and conventional 2DGS metrics revealed the distinct analytical insights provided by the volumetric perspective. The analysis yields several key findings. First, inequalities in 2DGS distribution are amplified in the 3DGV, indicating that area-based disparities lead to even greater volumetric imbalances. Second, the dynamics of 3DGV are more complex and sensitive; it exhibits a lagged and non-linear response to significant changes in surface greenery, making its equity patterns during urbanization more volatile than those of 2DGS. This underscores the critical limitation of relying solely on planar metrics, as they mask these heightened and more sensitive volumetric inequalities. Therefore, the study concludes that achieving equitable green space allocation requires planning policies and regulatory interventions specifically designed to monitor and manage 3DGV. The proposed framework offers a multidimensional, scientifically robust basis for spatial decision-making, providing innovative methodology for advancing sustainable and just urban green environments.

Keywords: landscape architecture; green space; three-dimensional green quantity; planning; fairness; random forest; spatiotemporal evolution

Biography

ZHOU Conghui, male, born in 1982 in Changsha, Hunan Province, Ph.D., Professor and Doctoral Supervisor at School of Architecture, Southeast University, Nationally Certified Urban and Rural Planner, research area: theory and methods of landscape architecture planning and design (Nanjing 210096)

ZONG Yuan, female, born in 1999 in Jinhua, Zhejiang Province, Master's student of Architecture, Southeast University, research area: intelligent landscape planning and design methods (Nanjing 210096)