城市蓝绿空间与生态系统服务

城市蓝绿空间生态效益测度及关键影响因子识别

——以南京中心城区为例

袁旸洋[1,2] 罗尚岑[1] 郭 蔚[1] 杨明珠[1] 陈艺文[3]

1 东南大学建筑学院 南京 210096
2 江苏省城乡与景观数字技术工程中心 南京 210096
3 南京理工大学 南京 210094

摘要：【目的】探索城市蓝绿空间生态效益测度方法，并识别关键影响因子，为蓝绿空间优化提供依据。【方法】以南京中心城区为研究对象，构建 AHP—熵权—TOPSIS 模型，开展综合雨洪韧性、降温效益、碳汇效益及生物多样性 4 个目标的生态效益测度研究；通过建立 GWR-XGBoost 模型，识别关键影响因子，采用 SHAP 模型解析关键因子对蓝绿空间生态效益的影响机制。【结果】1）南京中心城区生态效益呈现显著的区域差异，高生态效益区域表现为聚集、连续的分布特征，低生态效益区域多呈分散状。2）自然类因子中的 DEM 和 SLOPE 对城市蓝绿空间生态效益影响较大，格局类因子中类型层的 PLAND、SPLIT、ED 和 PLADJ 及斑块层中的 AREA、CONTIG、ENN、FRAC、CIRCLE 是关键影响因子。【结论】蓝绿空间的规模、布局、形态及内部结构对生态效益均有着一定程度的影响。未来研究需因地制宜选取测度指标、关注更为全面的影响因子，纳入更长的时间序列和更广的空间范围，开展更精细化的模拟研究，探索生态增效目标下的城市蓝绿空间发展预测与优化布局。

关键词：城市蓝绿空间；生态效益；影响因子；AHP—熵权—TOPSIS 模型；GWR-XGBoost 模型
DOI：10.12169/zgcsly.2025.07.25.0001

Ecological Benefits Measurement and Key Influencing Factor Identification for Urban Blue-Green Spaces: A Case Study of Nanjing City Core

Yuan Yangyang[1,2] Luo Shangcen[1] Guo Wei[1] Yang Mingzhu[1] Chen Yiwen[3]

(1. School of Architecture, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Jiangsu Provincial Urban and Rural Digital Technology Engineering Center, Nanjing 210096, China; 3. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: 【Objective】 This study aims to explore methods for measuring the ecological benefits of urban blue-green spaces and identify their key influencing factors, so as to provide a basis for the optimization of urban blue-green spaces. 【Method】 Taking the Nanjing city core as the study area, we construct an AHP-Entropy Weight-TOPSIS model to measure ecological benefits across four dimensions, i. e., stormwater resilience, cooling effect, carbon sequestration, and biodiversity. A GWR-XGBoost model is then developed to identify key influencing factors, and the SHAP model is employed to analyze the mechanisms through which these factors affect the ecological benefits of blue-green spaces. 【Result】 1)

收稿日期：2025-07-25
* 基金项目：国家自然科学基金重点项目（51838003）；东南大学“至善青年学者”支持计划（2242023R4002）
第一作者/通信作者：袁旸洋（1987- ），女，博士，副教授，硕士生导师，研究方向为风景园林规划设计及理论、数字景观技术、城市蓝绿空间。E-mail：yyy@ seu. edu. cn

The ecological benefits in Nanjing city core exhibit significant spatial heterogeneity. Areas with high ecological benefits tend to be continuously clustered, whereas areas with low ecological benefits are more dispersed; 2) Among natural factors, DEM and SLOPE have significant impacts on ecological benefits. In terms of spatial pattern metrics, key influencing factors include PLAND, SPLIT, ED, and PLADJ at the class level, and AREA, CONTIG, ENN, FRAC, and CIRCLE at the patch level.【Conclusion】 The scale, spatial layout, morphology, and internal structure of blue-green spaces all have an influence of varying degrees on their ecological benefits. The future research should select measurement indicator in line with local conditions, focus on influencing factors in broader spectrum, incorporate longer time series and wider spatial scope, and carry out more refined simulation so as to explore the development prediction and optimized layout of urban blue-green spaces under the goal of ecological benefit enhancement.

Keywords: urban blue-green space; ecological benefit; influencing factor; AHP-Entropy Weight-TOPSIS model; GWR-XGBoost model

蓝绿空间在消减城市旱涝、维持生物多样性、减缓城市热岛等方面发挥重要的生态服务作用[1]。将城市的蓝绿系统视作生态基础设施并开展科学规划[2]，已成为应对气候变化的重要研究课题。随着我国城市建设进入存量时代，如何使有限的蓝绿空间发挥更高效的生态效益、提供更优质的生态服务，成为一个亟待探索的问题[3]。

生态效益测度能够反映蓝绿空间所带来的一系列改善人类生存和生活环境的价值，有助于精准识别城市生态环境短板，指导空间布局优化，为城市规划与管理决策提供科学依据[4]。当下生态效益测度研究对象多为单一绿色或蓝色空间，关注雨洪韧性[5]、减碳固碳[6]、冷岛效应[7]和生物多样性[8]等单一目标评价，对“蓝绿空间”整体的综合性生态效益探讨较少。

针对单一目标的生态效益评价与测度方法各不相同，如在雨洪韧性的研究中，采用逼近理想值排序法（TOPSIS）对区域抗洪能力进行评估[9]；或者将地理探测器（GeoDetector）—决策实验室分析（DEMATEL）和聚类方法结合，综合性测度城市洪水风险[10]。在减碳固碳方面，利用熵权法确定城市尺度碳汇绩效评价指标权重[11]，构建“驱动力—压力—状态—影响—响应”（DPSIR）评价模型开展碳汇效能评估[12]。降温效益的测度主要体现为温度的量值，评价指标相对单一，多通过遥感反演[13]、样地实测[14]和模型模拟[15]等方法评估降温效果。生物多样性评估主要聚焦于物种和群落水平，由多样性指数指征，基于DSPIR的综合评估方法应用较为广泛[16]。相较于单一目标的评价，生态效益的综合性测度方法更具复杂性，需要科学筛选与生态效益相关的生态系统要素、结构特性、运行过程、功能表现和服务等指标。常用的方法包括频度分析法、专家咨询法和层次分析法（AHP）等。其中，AHP法可将复杂的决策问题分解成多个层次和要素，通过比较要素的相对重要性，生成一个优先级结构，适用于复杂决策[17]。但传统AHP方法依赖专家的先验知识，具有局限性。将熵权法与TOPSIS相结合，能够直观评价指标权重[18-19]，通过计算权重与理想解的距离进行最终指标重要性排序，从而减少主观因素的影响。

虽然对于各类影响城市生态效益因子的讨论已较为全面，但蓝绿空间内部格局关系对生态效益影响的研究有待开展。城市蓝绿空间生态效益的影响因子与响应变量存在着复杂的非线性关系，常用的线性回归拟合方法无法准确解析。同时，地理过程中因子间关系因空间位置不同而有所差异，普通线性回归模型也无法顾及空间位置对回归系数的影响。将地理加权回归模型（GWR）与极限梯度提升算法（XGBoost）相结合，能够更为精准地识别影响城市蓝绿空间生态效益的关键因子[20]。

本研究以南京中心城区为例，旨在探索一种城市蓝绿空间生态效益测度方法，并在此基础上识别关键影响因子，以期为蓝绿空间优化提供依据。

1 研究区概况

南京（31°14′—32°37′N，118°22′—119°14′E）是我国东部特大城市，本次研究范围为南京市中

心城区，总面积 804 km^2。南京属于北亚热带湿润气候，四季变化明显，年均降水量 1 090.4 mm，有着良好的自然环境禀赋。城市化进程中蓝绿空间受到挤压侵占，2000—2020 年蓝绿规模变化呈现先增后减再增的阶段性特征[21]。随着城市建设的推进，中心城区的热岛效应显著，丘陵、岗地等都存在一定程度的水土流失，湿地面积减少也造成了生物多样性的下降。

2　研究方法

2.1　数据来源与预处理

研究所采用数据包括遥感、植被和土壤数据等。从地理空间数据云平台获取 2020 年 Landsat-8 遥感影像数据（https://www.gscloud.cn/search），空间分辨率 30 m。在 ENVI 平台进行监督分类和人工目视解译修正，经过精度验证，获取研究区内土地利用数据，将林地、草地重分类成绿色空间，水体重分类成蓝色空间，生成南京中心城区蓝绿空间分布图（图 1）。从地理遥感生态网（http://www.gisrs.cn/）获取气象及植被类型数据，其中气象数据包括南京 13 个气象站点的气温、降水和日辐射数据，空间分辨率为 30 m。在 Google Earth Engine（https://earthengine.google.com/）中，对 Landsat-8 遥感影像数据进行校正和去云预处理，计算研究区 NDVI 数据，之后下载土壤分类数据，二者空间分辨率均为 30 m。

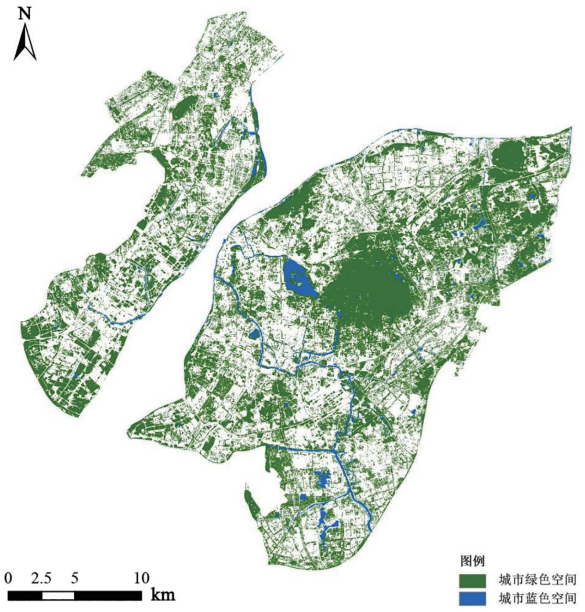


图 1　2020 年南京中心城区蓝绿空间分布

2.2　研究框架

研究主要包括城市蓝绿空间生态效益测度和关键影响因子识别 2 个部分（图 2）：1）建立 AHP—熵权—TOPSIS 模型，基于雨洪韧性、降温效益、碳汇效益以及生物多样性 4 个目标，计算蓝绿空间生态效益；2）构建蓝绿空间生态效益影响因子集，采用 GWR-XGBoost 模型识别关键影响因子。

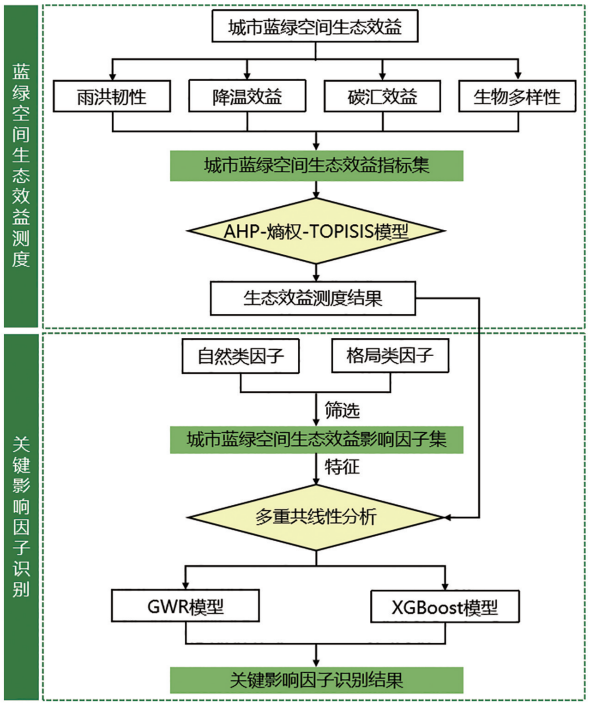


图 2　技术路线

2.3　测度指标集构建

初步筛选与城市蓝绿空间生态效益相关的指标[22-24]，构建雨洪韧性、降温效益、碳汇效益以及生物多样性 4 个目标对应的测度指标集（表 1）。雨洪韧性指标包括地表径流量和内涝点密度：一是采用 SCS-CN 水文模型对城市的径流量进行模拟；二是采用内涝点密度指征城市雨洪发生现状，评估内涝风险。采用地表温度（Land Surface Temperature，LST）指征蓝绿空间对地表降温的情况，用地表温度反演法进行计算[25]。选取净初级生产力和碳储量作为碳汇效益的测度指标，分别采用 CASA 模型和 InVEST 模型计算。选取生境质量作为研究区内生物多样性的测度指标，通过 InVEST 模型中生境模块计算。

表 1 城市蓝绿空间生态效益指标集

类型	指标符号	对生态效益的影响
雨洪韧性	地表径流量(Q)	负向
	内涝点密度(F_n)	负向
降温	地表温度(LST)	负向
碳汇	净初级生产力(NPP)	正向
	碳储量(C_t)	正向
生物多样性	生境质量(HQ)	正向

2.4 测度模型建立与计算

AHP—熵权—TOPSIS 模型的计算具体过程为：1）雨洪韧性、降温效益、碳汇效益、生物多样性 4 个目标的主观权重设为等权，即 0.25。2）运用熵权法计算各指标熵值，得到各指标权重。3）在此基础上构建加权指标数据矩阵，根据 TOPSIS 方法得到正理想解距离、负理想解距离（表 2），以及特征点的生态效益测度结果。因均为正理想解，在 ArcGIS 软件中，将上述计算结果的值与地理空间中各点关联，采用克里金插值得到研究区生态效益测度结果。

表 2 指标权重及正负理想解

目标层	准则层	指标层	主观权重	客观权重	权重	正理想解距离	负理想解距离
生态效益	雨洪韧性	地表径流量	0.25	0.038 198 458	0.121 341 038	0.0017	0
		内涝点密度		0.008 502 664	0.027 009 522	0.000 2	0
	降温	地表温度	0.25	0.005 817 567	0.127 908 784	0.002 9	0
	碳汇	净初级生产力	0.25	0.086 696 036	0.168 348 018	0.004 0	0
		碳储量		0.416 105 06	0.268 477 742	0.007 5	0
	生物多样性	生境质量	0.25	0.444 680 215	0.286 914 896	0.003 3	0

2.5 关键影响因子选取

影响因子分为自然与空间格局两大类。为避免重复导致误差，选取的自然类因子包括高程、坡度和坡向 3 项[26]。选取城市蓝绿空间格局指标中对生态效益改进具有显著影响的要素作为格局类因子，按照景观特征分成斑块和类型两个层次（表 3）[27-28]，共 15 项因子。

表 3 城市蓝绿空间生态效益影响因子集

类型			因子名称
自然类因子			高程(DEM)
			坡度(SLOPE)
			坡向(ASPECT)
格局类因子	斑块层	蓝绿斑块规模	面积(AREA)
			周长(PERIM)
		蓝绿斑块形态	分型维数(FRAC)
			近圆指数(CIRCLE)
		蓝绿斑块分布	邻近指数(CONTIG)
			斑块距离(ENN)
	类型层	蓝绿空间规模	面积占比(PLAND)
			最大斑块指数(LPI)
		蓝绿空间形状	边缘密度(ED)
			景观形状指数(LSI)
		蓝绿空间分布	相似邻接比(PLADJ)
			聚集度(AI)
			分裂度(SPLIT)
			内聚力指数(COHESION)
			破碎度(DIVISION)

2.6 关键影响因子识别

采用 GWR-XGBoost 模型进行影响因子排序，识别关键影响因子，步骤如下：1）运用全局莫兰指数（Global Moran's I）对生态效益测度结果进行空间自相关分析，得到数据集 1。2）采用全局莫兰指数工具，对生态效益测度结果进行处理，结果显示空间自相关莫兰系数为 0.78，P = 0，Z-score 的绝对值远大于 2.58，表明南京中心城区生态效益与空间分布存在着显著的正相关关系。3）通过方差膨胀因子（Variance Inflation Factor，VIF）判断数据集 1 中各变量间是否存在线性关系。将 VIF<5 的变量引入 GWR 模型进行计算，得到数据集 2；将 5≤VIF<10 的因子作为自变量，因变量为生态效益测度结果与 GWR 模型残差的结合，构建新的数据集 3，导入 XGBoost 模型进行训练；为避免模型的过拟合现象发生，将 XGBoost 模型训练所得关键影响因子与对应生态效益数据构建为新数据集 4，并使用 SHAP 模型进行解译。

3 结果与分析

3.1 生态效益测度

蓝绿空间生态效益各指标计算结果如图 3。从空间分布的整体特征来看（图 4），生态效益的分布呈现显著的区域差异，高生态效益区域表现为聚集、连续的分布特征，而低生态效益区域多呈分散状。典型高生态效益区域一般规模较大且

集中分布于钟山-玄武湖蓝绿斑块附近（图 4a），其次为栖霞山及周边区域（图 4b）。中心城区边缘区域的生态效益较高（图 4c～d），可能与边缘区域的建设密度较低有关。此外，还存在一些散落分布的高生态效益区域，位于幕府山等较大的绿色斑块或连续带状水体附近（图 4e～f）。典型低生态效益区域的共同特点为建成密度高、蓝绿斑块的规模小且破碎（图 4g～i）。

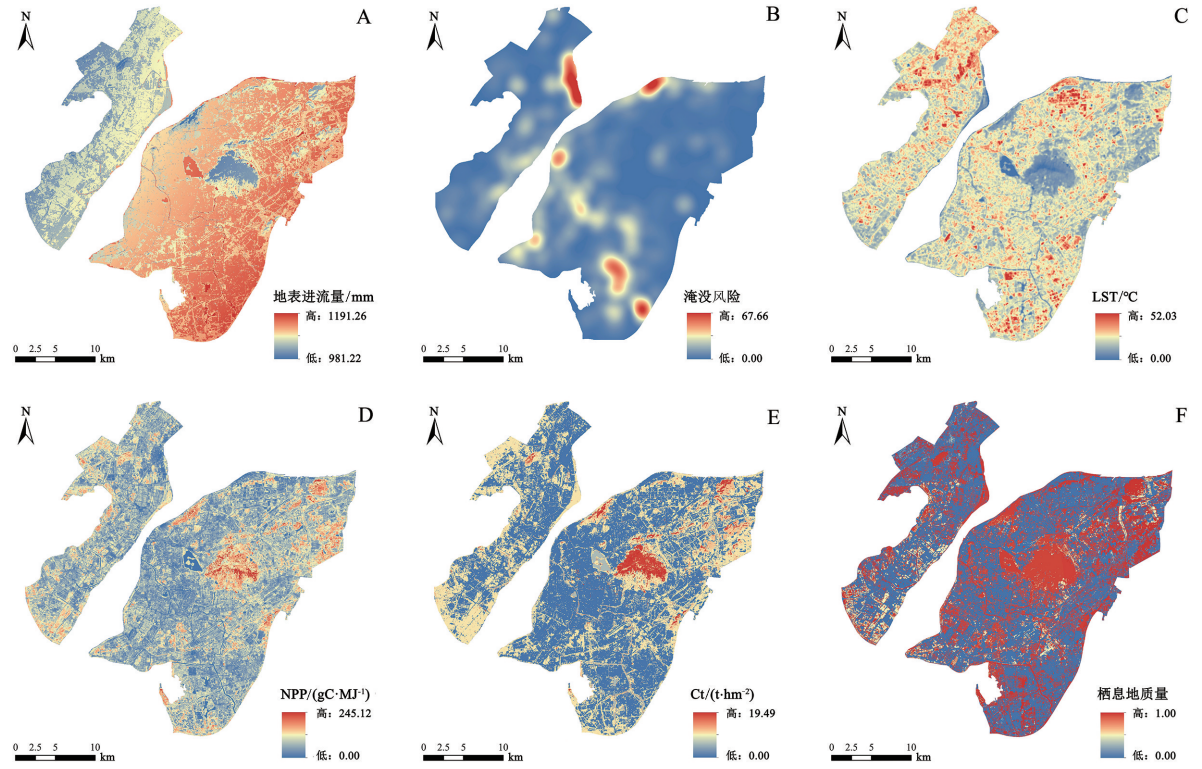


图 3　南京中心城区蓝绿空间生态效益测度指标集

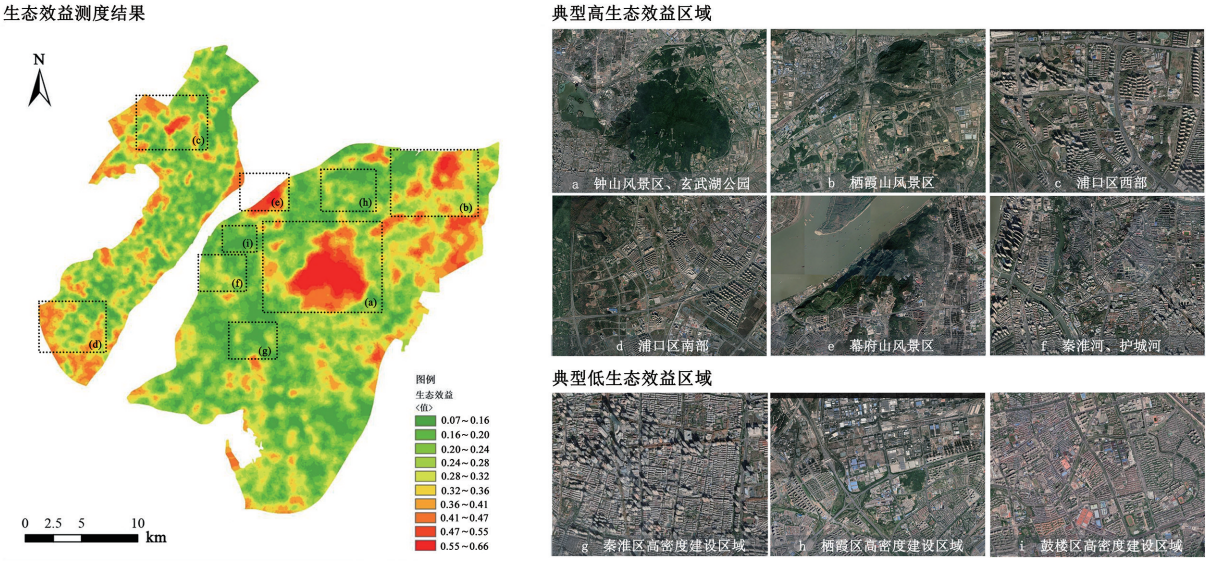


图 4　南京中心城区生态效益测度

3.2　关键影响因子识别

根据 VIF 判断结果，VIF<5 的因子为 DEM、ASPECT、SLOPE，格局类因子均具有较高的多重共线性。GWR 模型的拟合结果中，自然类因子中，SLOPE 对生态效益的影响最高，其次是 DEM，而 ASPECT 的影响较小。究其原因：1）地

形对降水、温度、日辐射等自然气候条件产生影响，进而影响到植被光合作用等生态过程；2）不同高程、坡度、坡向对生态环境稳定性会造成影响，高程、坡度越大的区域，越容易被外界环境的干扰所影响[29]。3）地形起伏情况、地表陡缓程度为城市洪涝灾害韧性、生物多样性的主要驱动因素[30]。

基于 XGBoost 模型回归分析获得格局类因子重要特征排序前 9 的为 AREA、PLAND、SPLIT、CONTIG、ENN、FRAC、CIRCLE、PLADJ、ED（图 5）。

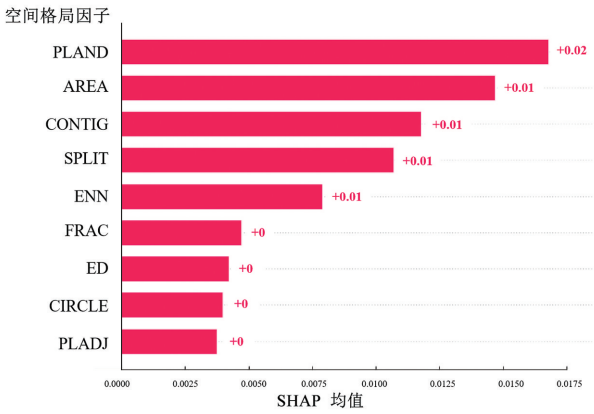


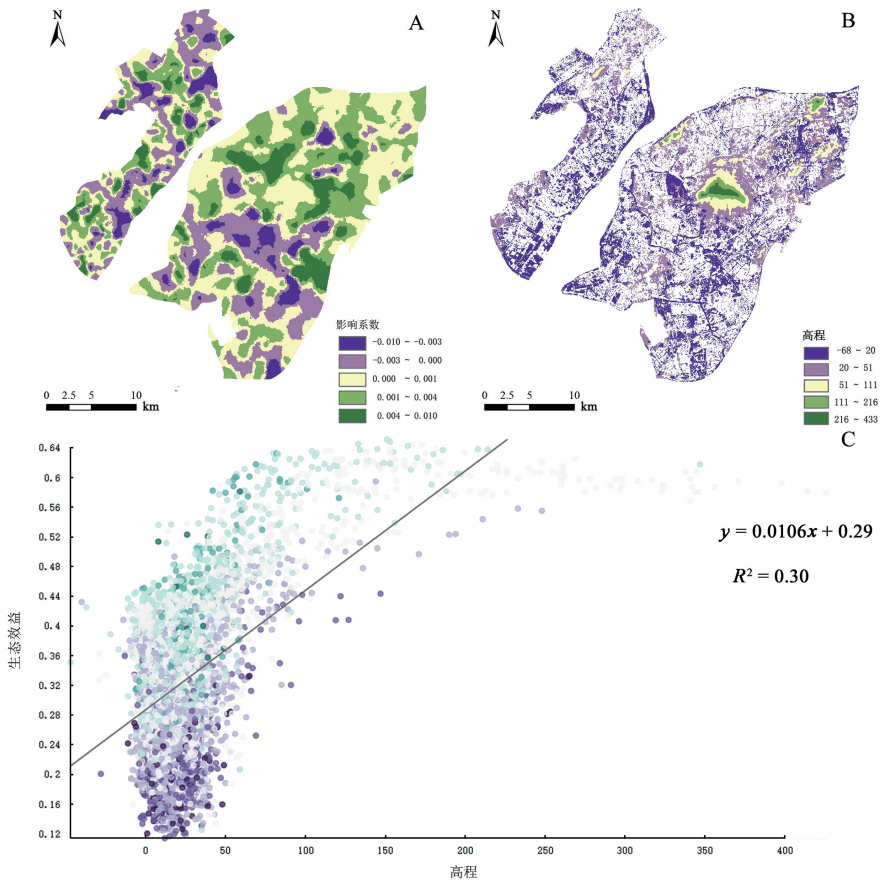
图 5 格局类因子重要特征排序

3.3 关键因子影响机制

3.3.1 自然类因子

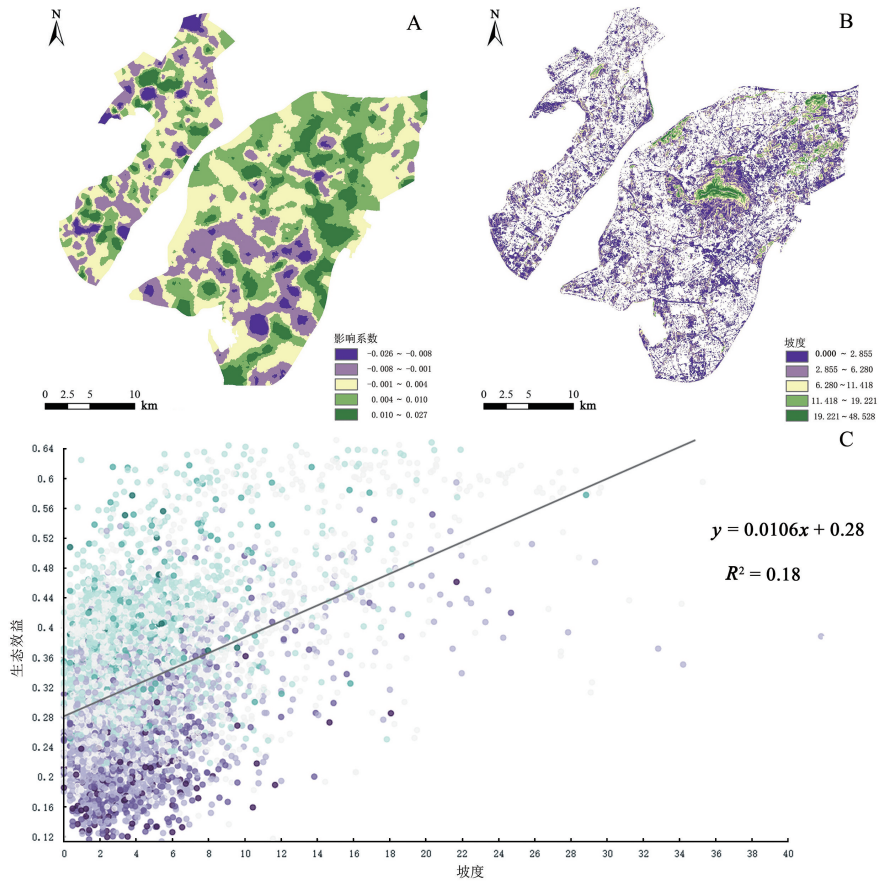
当高程为 20~50 m 时，与生态效益的正相关关系最为显著；高程<20 m 时，与生态效益既存在正相关也有负相关（图 6A~B）。总体趋势来看，高程与生态效益间呈正相关关系（图 6C）：当高程小于 0 m 的时候，生态效益较高；高程为 0~100 m 时，高程越高，生态效益越好；当高程大于 100 m，随着高程增加，生态效益不再显著提升。

当坡度>6.28 时，与生态效益的关系不显著，即坡度对生态效益的影响较小（图 7A~B）。由于决定系数 R^2 仅为 0.18，故只有大约 18.2% 的生态效益变化可通过坡度来解释，其他因子对生态效益的影响比坡度更为显著（图 7C）。



注：A 反映不同区域高程与生态效益的相关关系；B 反映不同区域高程；C 反映高程与生态效益的相关性分析结果及数量关系。

图 6 高程—生态效益 GWR 模型回归分析



注：A 反映不同区域坡度与生态效益的相关关系；B 反映不同区域坡度；C 反映坡度与生态效益的相关性分析结果及数量关系。

图 7　坡度—生态效益 GWR 模型回归分析

3.3.2　格局类因子

类型层指标 PLAND，以及斑块层指标 CONTIG、AREA，与生态效益存在正相关；明显呈负相关的指标包括类型层指标中 ED、ENN（图 8）。

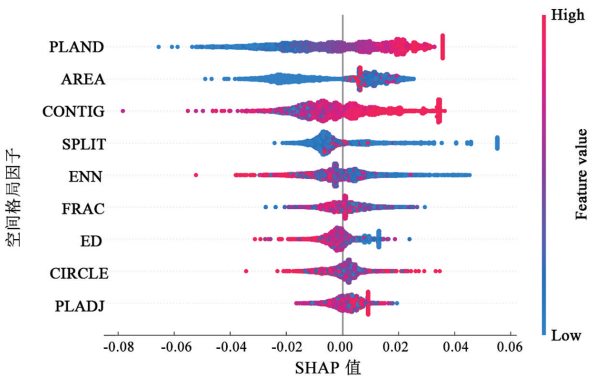


图 8　格局类因子影响程度排序

1）斑块层。AREA 与生态效益呈正相关（图 9A）。当 AREA 在 0 值附近时，生态效益变化区间较大，表明在小面积范围内，蓝绿斑块面积对生态效益的发挥影响显著；当蓝绿斑块的面积大于 1 000 hm^2时，SHAP 值的分布相对稳定，面积增加对生态效益提升作用的显著性下降，这与降温效益的“阈值效应（TVoE）”类似[31]。CONTIG 与生态效益之间呈显著的正相关（图 9B）。当 CONTIG 的值大于 0.8 时，随着 CONTIG 值增大，生态效益提升的趋势显著；在 CONTIG 的值接近 1 时，SHAP 值的波动程度有所减少，表明高邻近度对生态效益的影响较为一致。这一方面是因为增加连通性有助于城市蓝绿空间的布局更加均衡，从而更好地发挥降温效应；另一方面，蓝绿空间连通性的增大带来了土壤水文连通性的增加，增大了地表产汇流能力、蓝绿蓄滞能力[23]。ENN 值在 0~500 区间，ENN 与生态效益呈正相关（图 9C）。当 ENN 大于 500 时，随着 ENN 值增大，生态效益降低，说明一定范围内蓝绿斑块之间距离的增大，有利于生态效益的发挥，但此时蓝绿斑块存在破碎化趋势，直接影响了生

境质量[32-33]。究其原因：一方面，蓝绿空间的破碎导致联系减弱，阻断了物质交换与能量流动；另一方面，蓝绿空间的破碎化程度越低，绿地和水体聚集度高，可以更高效地消减地表径流和储存雨水，从而降低周边城市区域的内涝程度[34]。当 FRAC 值处于 1.0~1.24 时，其与生态效益间没有明显的正负关系（图 9D），表明 FRAC 变化对生态效益的影响不具有一致性，需结合具体的蓝绿空间分布模式及其他影响因素综合分析。当 FRAC 值处于 1.25~1.4 时，与生态效益之间呈正相关（图 9D）。这可能是因为复杂的斑块边缘形状增加了栖息地边界的丰富性和多样性，有助于生物种类的繁荣和生态交流。CIRCLE 值接近 1 时，即蓝绿斑块形状呈现狭长的线性时，其生态效益显著上升（图 9E）。狭长型蓝绿空间通常是城市中的河流及其两岸绿地，水绿接触面积增加促进了物种、能量和营养跨界面的流动[35]。

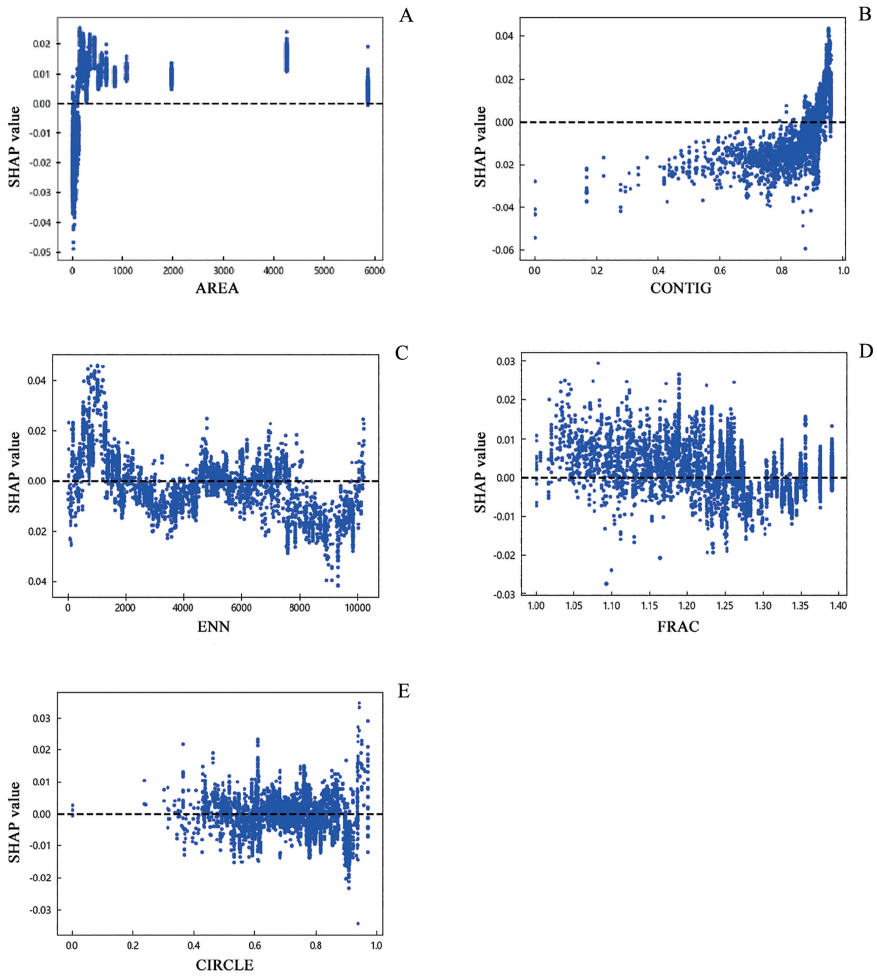


图 9 斑块层 SHAP 特征依赖图

2）类型层。类型层中 PLAND 与生态效益呈显著正相关（图 10A），即在一定空间范围内，随着蓝绿空间占比的增加，对生态效益的正向影响也在增加。SHAP 值大于 80%时达到一个上限，若 PLAND 值继续增大，生态效益的提升幅度稍有变缓。由此说明，无限制地扩增蓝绿空间并不能带来生态效益的不断提升。图 10B 中，SPLIT 值接近 0 时，SHAP 值有显著的正峰值，随着分离度的增加，SHAP 值迅速下降至 0，并在附近稳定。分离程度表征蓝绿空间的破碎度，当分离度低时，对生态效益的贡献是正向的，一旦超过某个阈值，对生态效益的影响就会减少。原因如下：1）蓝绿空间破碎度高，加剧了洪涝和绿地缺水的两极化矛盾，引起蓝绿空间生态效能的减弱。2）蓝绿空间的聚集程度会影响降温效益、固碳能力。城市绿地聚集度与地

表温度呈显著的负相关性，即绿地破碎度程度越高，降温幅度及距离显著减少[36]。而高聚集度的蓝绿空间温度相对较低，阻断了高温对植物光合作用的胁迫，有助于植物碳汇效益的发挥[37]。3）破碎带来蓝绿空间彼此联系减弱，阻断了物质交换与能量流动。由图 10C 可知，随着 ED 值增大，SHAP 值趋于负值，表明边缘密度增加对生态效益产生负向影响。较高的 ED 值与较小、分散的斑块相对应，复杂度高代表了生境破碎化，影响生态效益的发挥。由图 10D 可知，随着 PLADJ 值的增加，SHAP 值整体呈现一定程度的正向趋势，原因可能在于高 PLADJ 值意味着同一类型的生境斑块在空间上更连续，提高了物种生存和繁殖的可能性。

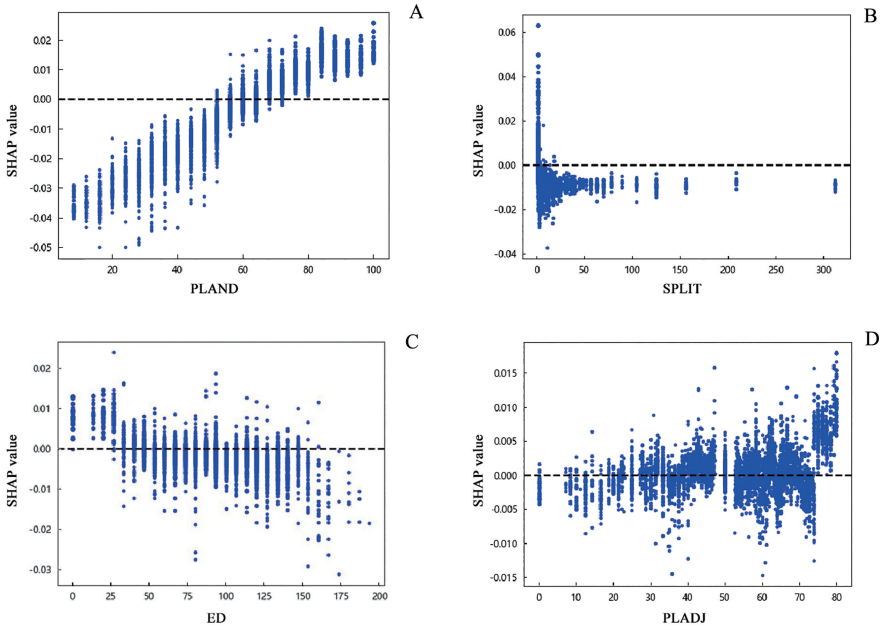


图 10　类型层 SHAP 特征依赖图

4　以生态效益提升为目标的城市蓝绿空间优化建议

4.1　扩增蓝绿空间规模

鉴于城市建设实际，蓝绿空间规模的提升可从大型蓝绿斑块保护及小微蓝绿斑增补两个方面入手。一方面，保护重要大型蓝绿斑块，提升蓝绿斑块的优势度，结合多生态目标开展生态敏感性评价，适当扩大生态保护区面积，为城市空间的开发提供底线依据；另一方面，基于规划的既定蓝绿空间总量，精细化调控各类用地的附属绿地规模，在保证绿地率的同时，还应关注水面率，恢复被填埋的沟、渠、小溪等水网末端支流、修复边角绿色空间，提高蓝绿空间的分布密度与占比。

4.2　优化蓝绿空间布局

“存量”发展时代，蓝绿空间规模扩增有限，更需合理利用现有蓝绿资源、优化蓝绿空间，在有限规模下提升复合功能与生态效益。面积相同情况下，不同的蓝绿空间分布所发挥的生态效益各异[38]。本研究发现提高城市蓝绿空间的聚集度、降低破碎度、提高连通性是提升生态效益的有效路径，即“连点成线，连线成面”。建成环境大量分布的碎片化绿地具有较高的生态潜力，可在小微绿地间、小微绿地与大型蓝绿斑块间构建生态走廊，增加线性廊道宽度，织补城市中心城区蓝绿空间网络，提升蓝绿斑块之间的连通性。

4.3　改善蓝绿空间形状

自然植被覆盖率高且人为干扰少的蓝绿空间形状通常不易受周围环境影响，内部更稳定并具有高物种丰富度，生态效益更好。在市域及城区尺度上，应根据蓝绿空间不同的形态及空间组合开展针对性地规划设计，如面状水域或线形水体，保护滨水岸线的多样性及山林地的自然边界。面对地块或街区尺度，应精细化调控蓝绿空间形态，避免大量规则化的蓝绿斑块边界，在蓝绿空间与灰色空间之间增加过渡区域，适当提升城市蓝绿

空间的形状复杂度，增大蓝绿空间的渗透作用。

4.4 实施蓝绿融合规划

本研究发现，当“蓝中有绿，绿中有蓝”，蓝绿空间内部结构呈现出较好伴生关系时生态效益最高。蓝绿生态空间的融合旨在增强城市生态韧性、增进生态系统间的协同作用，提升蓝绿系统的互补性和互适性。人居环境蓝绿空间的融合依赖于系统的整体最优化，需要对城市生态环境进行综合梳理与统筹，重塑各类蓝绿空间要素之间相互关联与作用的有序状态，优化蓝绿空间内在结构的整体性、连续性和可持续性，通过统调形态进而实现最佳生态效益。

5 结论

南京中心城区生态效益呈现显著的区域差异，高生态效益区域表现为聚集、连续的分布特征，而低生态效益区域多呈现分散状。自然类因子中的 DEM 和 SLOPE 对城市蓝绿空间生态效益的影响较大，格局类因子中类型层的 PLAND、SPLIT、ED 和 PLADJ 及斑块层中的 AREA、CONTIG、ENN、FRAC、CIRCLE 是关键影响因子。蓝绿空间的规模、布局、形态及内部结构对生态效益均有着一定程度影响。

本研究还存在一些局限性。首先，不同地域、城市所面对的生态环境问题不同，蓝绿空间生态效益目标有所差异，因此本研究所构建的测度方法在应用于不同城市时，需因地制宜选取测度指标。其次，在生态效益影响因子的选取上，本研究侧重于探索蓝绿空间形态特征对生态效益的影响，实现形态调控基础上的生态效益提升，以后研究可关注更为全面的影响因子，更广泛地讨论其他类型因子对生态效益的影响。最后，城市蓝绿空间演变是一个长期的动态过程，未来研究可纳入更长的时间序列和更广的空间范围，将不同自然气候条件和经济发展水平的城市作为案例以探究蓝绿空间生态效益变化情况，开展更精细化地模拟研究，探索生态增效目标下的城市蓝绿空间发展预测与优化布局。

参考文献

[1]袁旸洋,张佳琦,汤思琪,等.基于文献计量分析的城市蓝绿空间生态效益研究综述与展望[J].园林,2023,40(4):59-67.

[2]马驰骋,杨东峰.城市发展带建设用地和蓝绿空间时空演替特征研究:以沈大城市发展带为例[J].规划师,2025,41(1):50-58.

[3]杜文武,卿腊梅,吴宇航,等.公园城市理念下森林生态系统服务功能提升[J].风景园林,2020,27(10):43-50.

[4]KWAK Y,CHEN S.Integrating seasonal climate variability and spatial accessibility in ecosystem service value assessment for optimized NbS allocation[J].Urban Climate,2025,59:102314.

[5]ZHANG Y,YIN H W,LIU M,et al.Evaluating the effectiveness of environmental sustainability indicators in optimizing green-grey infrastructure for sustainable stormwater management[J].Water Research,2025,272:122932.

[6]李佳欣,刘晖,王晶懋,等.基于功能性状的城市绿地植物群落碳汇效益评估[J].园林,2025,42(7):23-31.

[7]BHATTARAI S,BANJARA P,PANDEY V P,et al.Quantifying the cooling effects of blue-green spaces across urban landscapes:a case study of Kathmandu Valley,Nepal[J].Urban Climate,2025,61:102493.

[8]CASTELLI K R,SILVA A M,DUNNING J B.Improving the biodiversity in urban green spaces:a nature basedapproach[J].Ecological Engineering,2021,173:106398.

[9]WEN G F,JI F Y.Flood resilience assessment of region based on TOPSIS-BOA-RF integrated model[J].Ecological Indicators,2024,169:112901.

[10]ZHENG C X,YANG W C,JIANG X L,et al.A novel integrated urban flood risk assessment approach coupling Geodetector-Dematel and Clustering method[J].Journal of Environmental Management,2024,354:120308.

[11]ZHAO J Y,LI Z Y,WU J,et al.Ecological spatial network optimization of carbon sink patches for enhanced carbon sink in Wuhan Metropolitan Area,China[J].Ecological Indicators,2024,165:112177.

[12]QUEVEDO J M D,UCHIYAMA Y,KOHSAKA R.A blue carbon ecosystems qualitative assessment applying the DPSIR framework:Local perspective of global benefits and contributions[J].Marine Policy,2021,128:104462.

[13]DAS M,DAS A,RAJJAK A,et al.Understanding the seasonal pattern and factors affecting cooling effect of blue spaces:a case from a Mega Metropolitan Area (India)[J].Sustainable Cities and Society,2025,130:106656.

[14]LI Q,LI Q,WU H T,et al.Can rainfall adequately replenish soil moisture to ensure a continuous cooling effect of small urban green spaces in the rain-abundant city?[J].Urban Forestry & Urban Greening,2025,112:128987.

[15]XIE WW,YANG H,LUO P,et al.Hydrological connectivity creates additional cooling effects for urban wetland complexes[J].Urban Climate,2025,61:102470.

[16]ZHAO D D, LIU J G, SUN L X, et al. Water consumption and biodiversity: Responses to global emergency events[J]. Science Bulletin, 2024, 69(16): 2632-2646.

[17]OSSÉNI A A, GBESSO G H F, YEVIDE S I A, et al. Suitability evaluation for urban green space areas in Sèmè-podji district (southern Benin), using GIS and AHP methods[J]. Revue Internationale de Géomatique, 2024, 33(1): 201-220.

[18]LUO Z Y, TIAN J, ZENG J, et al. Flood risk evaluation of the coastal city by the EWM-TOPSIS and machine learning hybrid method[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2024, 106: 104435.

[19]CHEN Y, CAO W Y, DING K W, et al. Comprehensive assessment of ecological vulnerability in arid-semiarid regions based on the ACEVI model and ANP-EWM method: a case study of the HBOYUA (China)[J]. Ecological Informatics, 2025, 90: 103344.

[20]FOTHERINGHAM A S, CRESPO R, YAO J. Geographical and temporal weighted regression (GTWR)[J]. Geographical Analysis, 2015, 47(4): 431-452.

[21]YUAN Y Y, TANG S Q, GUO W, et al. Spatiotemporal dynamics and driving factors of green-blue space in High-Density Cities: evidence from central Nanjing[J]. Ecological Indicators, 2024, 160: 111860.

[22]翟国方. 气候变化背景下规划视角的城市雨洪灾害韧性应对：关键概念、基本思路和通用框架[J]. 城市规划学刊, 2024(1): 29-37.

[23]成玉宁, 王雪原. 城市蓝绿空间融合规划的生态逻辑[J]. 中国园林, 2023, 39(10): 39-43.

[24]GUNAWARDENA K R, WELLS M J, KERSHAW T. Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity[J]. Science of The Total Environment, 2017, 584: 1040-1055.

[25]袁旸洋, 张佳琦, 郭蔚, 等. 南京主城区蓝绿空间格局对降温效益的影响及其协同作用研究[J]. 园林, 2023, 40(8): 57-64.

[26]盛舒童, 刘艳芳, 刘耀林, 等. 山东沿海生态系统服务协同与权衡的空间格局及驱动力[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 384-392.

[27]吴健生, 张朴华. 城市景观格局对城市内涝的影响研究：以深圳市为例[J]. 地理学报, 2017, 72(3): 444-456.

[28]王敏, 宋昊洋. 影响碳中和的城市绿地空间特征与精细化管控实施框架[J]. 风景园林, 2022, 29(5): 17-23.

[29]黄子慧, 陈晓宇. 基于 GIS 的滇池流域生态敏感性分析[J]. 中南农业科技, 2025(4): 111-115, 120.

[30]李海洋, 吕朋超, 江岭, 等. 面向城市雨洪模拟的地表汇流特性 DEM 增强表达[J]. 地球信息科学学报, 2025, 27(2): 491-506.

[31]YU Z W, GUO X Y, JØRGENSEN G, et al. How can urban green spaces be planned for climate adaptation in subtropical cities? [J]. Ecological Indicators, 2017, 82: 152-162.

[32]袁旸洋, 郭蔚, 汤思琪, 等. 城市蓝绿空间格局对碳固存的影响测度及关键指标[J]. 中国城市林业, 2023, 21(6): 6-16.

[33]LIU S L, YIN Y J, LIU X H, et al. Ecosystem services and landscape change associated with plantation expansion in a tropical rainforest region of Southwest China[J]. Ecological Modelling, 2017, 353: 129-138.

[34]吴涌平, 林钰珺, 吴姝婷, 等. 福州市景观格局对城市内涝的影响[J]. 中国城市林业, 2020, 18(2): 57-61.

[35]李娜, 杨磊, 邓绪伟, 等. 湖泊形态与水生植物多样性关系：以长江中下游湖群典型湖泊为例[J]. 植物科学学报, 2018, 36(1): 65-72.

[36]董建权, 彭建. 绿地空间降温效应综述：景观调控视角[J]. 生态学报, 2024, 44(4): 1336-1346.

[37]孙洋洋, 沈泽琦, 黄乐妍, 等. 不同城市绿地类型碳源/汇的城乡梯度格局：以杭州市为例[J]. 生态学报, 2024, 44(3): 930-943.

[38]LI X T, JIA B Q, LI F, et al. Effects of multi-scale structure of blue-green space on urban forest carbon density: Beijing, China case study[J]. Science of The Total Environment, 2023, 883: 163682.