蓝绿空间与生态系统服务

基于可解释机器学习的北京第二道绿化隔离地区蓝绿空间退化机制

刘煜彤 李 喆 常可馨 葛韵宇 李 雄

（北京林业大学园林学院，北京 100083）

摘要：【目的】揭示在高密度扩张背景下，绿化隔离地区蓝绿空间演变的非线性驱动机制，为超大城市绿化隔离地区的智慧调控提供一种数据驱动、机理透明、阈值可循的分析范式。【方法】以北京第二道绿化隔离地区为对象，基于 2003—2020 年蓝绿空间面积、结构、功能特征指标变化量，识别退化特征。采用 LightGBM-SHAP 可解释机器学习模型，量化二维、三维城市形态及社会经济相关扩张因子对蓝绿空间退化的贡献。【结果】1）识别出 5 类蓝绿空间演变模式，其中“综合退化型”“面积侵占型”和“隐性滞后型”为典型退化路径；2）面积与结构退化主要受不透水面占比变化的单向主导；功能退化表现为多因子协同胁迫，对夜间灯光强度、建筑密度等扩张变化更为敏感；3）关键驱动因子在全域与各分簇模型中表现出差异化的阈值区间。【结论】绿化隔离地区蓝绿空间退化呈现多维类型分异，不同退化类型的驱动机制存在差异，城市扩张胁迫的边际效应呈现复杂的非线性与阈值特征。研究结果可为绿化隔离地区精细化管控提供依据。

关键词：蓝绿空间；绿化隔离地区；城市扩张；退化机制；LightGBM-SHAP

DOI：10.12169/zgcsly.2025.12.26.0004

Blue-Green Space Degradation in Beijing’s Second Greenbelt Area Based on Explainable Machine Learning

Liu Yutong Li Zhe Chang Kexin Ge Yunyu Li Xiong

（School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China）

Abstract：【Objective】This study aims to reveal the nonlinear driving mechanisms behind the evolution of blue-green spaces in greenbelt areas under high-density urban expansion, thereby providing a data-driven, mechanistically transparent, and threshold-guided analytical paradigm for the smart greenbelt management in mega-cities.【Method】Taking Beijing’s Second Greenbelt Area (2003-2020) as a case, we identify degradation characteristics based on the quantified changes in area, structure, and function of blue-green spaces. A LightGBM-SHAP framework is employed to quantify the contributions of expansion-related factors, including 2D/3D urban morphology and socioeconomic activities, to blue-green space degradation.【Result】1) Five distinct blue-green space evolution patterns are identified, among which the comprehensive degradation, area encroachment and latent lagging are the dominant pathways to degradation; 2) Area and structural degradation are predominantly driven by impervious surface expansion, while functional degradation is driven by synergistic interactions among multiple factors, which

收稿日期：2025-12-26

* 基金项目：国家自然科学基金委员会，青年科学基金项目（C 类）［原青年科学基金项目］（52308047）

第一作者：刘煜彤，女，1996 年生，博士生，研究方向为风景园林规划与设计。E-mail：yutong@bjfu.edu.cn

通信作者：葛韵宇，女，1992 年生，博士，副教授，研究方向为风景园林规划与设计、绿色空间生态系统服务。E-mail：geyunyu717@bjfu.edu.cn

is more sensitive to expansion variations in nighttime light intensity and building density; and 3) Key driving factors exhibit differentiated threshold ranges across the whole-region and cluster-specific models. 【Conclusion】 Blue-green space degradation in greenbelt areas presents a multidimensional typological differentiation, while driving mechanisms vary across degradation types. The marginal effects of urban expansion pressures demonstrate complex nonlinear and threshold characteristics, providing a basis for the precise management of greenbelt areas.

Keywords: blue-green space; greenbelt area; urban expansion; degradation mechanism; LightGBM-SHAP

在快速城市化进程中，为应对无序蔓延、人口过度集聚等“大城市病”[1-2]，建立绿化隔离地区或城市绿环已成为调控城市空间结构、维系区域生态安全的重要政策性工具[3-4]。城乡缓冲带不仅承担着物理屏障与空间管控的刚性职能，更是具有特殊区位与多重功能的城市—生态复合适应系统[5]。随着我国城镇化进入高质量发展阶段，北京、上海、天津、成都等超大城市相继实施了大规模绿化隔离带或环城生态公园带建设[6]。在此背景下，如何精准诊断城郊生态空间动态，支撑构建蓝绿交织的韧性网络，是国土空间治理与人居环境优化的重要议题。

然而，绿化隔离地区处于城乡土地博弈前沿，高强度城市扩张持续挤压蓝绿空间，导致生态基底收缩，并对水热调节、碳汇等生态过程形成胁迫，引发功能协同衰退[7]。既有研究证实了城市扩张的生态负效应，但多集中于中心城区、城市或都市圈的宏观尺度[8-10]，对绿化隔离地区这一特定政策单元解析不足。此外，传统视角多侧重于绿地面积与植被覆盖损失[11-13]，相对忽视蓝绿空间作为整体在结构与功能层面的综合退化。部分学者关注了绿隔地区的景观格局[14]或特定生态系统服务[15-17]，但对其内部“扩张—退化”过程的微观响应机制缺乏精细量化。

城市扩张并非单一的二维土地覆盖扩展，而是涵盖三维建成形态与社会经济活力的多维过程。近年研究开始整合建筑密度、高度等多因子交互作用，刻画其对生态空间的复合挤压效应[18-21]，二者间存在复杂的非线性耦合与阈值特征，传统线性模型难以有效捕捉，制约了规划决策的科学性。基于决策树的集成学习算法因其在处理高维非线性数据上的优势，逐渐引入城市生态研究[22-23]。配合 SHAP 解释框架，能够有效克服“黑箱”弊端，量化驱动因子相对贡献度并识别阈值区间，为将数据挖掘转译为可理解、可操作的规划经验提供了桥梁。

研究以北京第二道绿化隔离地区（以下简称二绿地区）为对象，构建“特征感知—机制诊断—规划响应”框架：首先，评估蓝绿空间多维退化特征及空间分异；进而结合 LightGBM-SHAP 模型解析城市扩张对不同退化模式的驱动机制；最后，基于量化证据提出分类治理策略。

1 研究区概况

依据《北京城市总体规划（2016—2035 年）》，二绿地区包含实体生态空间与政策实施单元两个空间层次。为揭示城市扩张对蓝绿空间的胁迫机制，需将承载建设活动与社会经济要素的行政范围纳入考量。因此选取政策实施单元为研究对象，其范围内邻一道绿隔实施单元边界，外至相关乡镇行政界线，总面积约 2 700 km^2（图 1）。该区域长期承受土地开发与人口集聚压力，形成了建成空间与蓝绿空间高度交错的典型城市边缘过渡格局，具有较强代表性。

研究时限为 2003—2020 年，以《北京市第二道绿化隔离地区规划》批复为起点，考察近 20 年城市空间持续外延下的绿隔动态，有助于透过政策干预下的生态建设成效，识别退化的关键空间与深层机制[24-25]。

2 研究方法

2.1 数据来源与预处理

研究使用 2003 年与 2020 年两期多源数据。土地利用数据源自 30 m 分辨率的 CLCD 中国年度土地覆盖数据集[26]，为刻画生态基底整体变化特征，将耕地、林地、草地、水体及湿地合并为



图 1　二绿地区研究范围

“蓝绿空间”一级类，重点分析变化的相对趋势，以降低类间误差对结果的影响。生态功能方面，基于 Landsat 卫星影像与 ERA5-Land 气象数据，借助 Google Earth Engine 平台重构研究区两期生长季（5—9 月）500 m 分辨率的植被净初级生产力（NPP）与蒸散发（ET）。三维形态数据源自 CMAB 中国多属性建筑数据集[27]，通过整合建筑轮廓、建造年代与高度等矢量信息，用于后续分析建模。社会经济数据采用 500 m 分辨率“类 NPP-VIIRS”夜间灯光栅格数据[28]和 100 m 分辨率 WorldPop 人口栅格数据[29]。

计算阶段采用原始高分辨率数据完成土地利用面积占比、景观格局及建筑形态等指标的提取；分析阶段将各类指标结果在空间上汇总至 500 m×500 m 规则格网，作为数据融合与模型归因的基本分析单元，不同分辨率数据在汇总前完成空间对齐。该网格尺度考虑了数据匹配稳定性，同时兼顾空间异质性刻画与计算效率的平衡。

2.2　蓝绿空间退化特征评估

考虑到二绿地区量减提质的转型特征，构建涵盖“面积—结构—功能”的综合退化评估体系[30]（表 1）。所有指标均基于 2020 年与 2003 年的差值（Δ）进行计算，以量化其变化方向与幅度。面积维度采用蓝绿空间面积占比（PLAND）表征生态基底存量。结构维度关注景观破碎化与复杂度的演变，选取面积加权分形维数（FRAC_AM）与邻接度指数（CONTIG）反映建设活动对自然边界的平整化干扰及连通性破坏[31]。功能维度选取植被净初级生产力（NPP）与蒸散发（ET）分别表征固碳与水热调节能力。采用主成分分析分别对结构与功能维度的差值矩阵进行降维，提取第一主成分构建结构指数（SDI）与功能指数（FDI）。进一步采用 K-Medoids 聚类进行退化模式分组识别，该算法对异常值具有更强鲁棒性[32]，能自下而上挖掘数据异质性演变特征，弥补静态分类框架局限。

表 1　蓝绿空间退化评估体系

维度	综合指数	指标	退化表征(Δ 值为负时)
面积	—	蓝绿空间面积占比(PLAND)	基底流失:数值下降表示生态用地被建设用地置换
结构	结构指数(SDI)	面积加权分形维数(FRAC_AM)	形态规整化:数值下降表示斑块边缘由自然复杂趋向人工规整
		邻接度指数(CONTIG)	破碎化:数值下降表示生态斑块间的连通性降低
功能	功能指数(FDI)	植被净初级生产力(NPP)	活力衰退:数值下降表示植被固碳能力降低,生长状况恶化
		蒸散发(ET)	调节失衡:数值下降表示区域水热调节能力减弱

2.3　城市扩张驱动因子选取

城市扩张对蓝绿空间的胁迫是空间侵占与社会经济干扰的叠加过程。研究从二维覆盖、三维形态与社会经济 3 个维度选取了 6 项驱动因子（表 2）。建设扩张以不透水面和建筑为主导[33]：选取不透水面占比（ISP）、建筑密度（BD）、建筑邻接度指数（CONTIG_B）和容积率（FAR）4 项指标，从水平与垂直方向量化城市扩张强度。考虑到数据的时空分辨率匹配性，选取人口密度（POP）与平均夜间灯光强度（ANTL）反映社会经济维度。为刻画扩张的动态增量并与退化评估体系保持一致，实际纳入归因模型的驱动因子均为各指标研究期内的变化量。此外，方差膨胀因子诊断显示所有指标 VIF 均小于 10，无严重多重共线性。

表 2 城市扩张驱动因子

维度	驱动因子	计算方法	变量含义
二维覆盖	不透水面占比(ISP)	$ISP=\frac{A_{imp}}{A}$	A_{imp}为网格内不透水面总面积(m^2);A 为网格面积(m^2)
	建筑密度(BD)	$BD=\frac{\sum_{i=1}^{n}B_i}{A}$	B_i为网格内第 i 个像元内的建筑基底面积(m^2)
	建筑邻接度指数(CONTIG_B)	$CONTIG_B=\frac{\left[\frac{\sum_{r=1}^{z}C_{jr}}{n_j}\right]-1}{v-1}$	C_{jr}为建筑斑块 j 中像元 z 的邻接值;n_j为建筑斑块 j 的像元总数;v 为 3x3 邻域的总像元数(即 9)
三维形态	容积率(FAR)	$FAR=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(B_i\times\frac{H_i}{3}\right)}{A}$	H_i 为网格内第 i 个像元的建筑高度(m),除以标准层高(3 m)转换为层数
社会经济	平均夜间灯光强度(ANTL)	$ANTL=\frac{\sum_{i=1}^{n}DN_i}{N}$	DNi 为网格内第 i 个像元的辐射亮度;N 为网格内的有效像元总数
	人口密度(POP)	$POP=\frac{P}{A_k}$	P 为网格内的人口数;A_k为网格面积(km^2)

注：表中公式为单一年份指标计算方法；模型实际输入的自变量为 2020 年与 2003 年的变化量（即 ΔISP、ΔBD 等）。

2.4 驱动因素分析与阈值识别

LightGBM 算法采用基于梯度的单边采样与互斥特征捆绑等策略[34]，提升了模型的训练速度和泛化性能。为深入探究驱动机制的空间异质性，设计了“全域—分簇”的双层建模方案：全域模型以全样本识别扩张与退化的普遍性规律，基于聚类结果构建分簇模型解析不同退化路径的主导因子差异。模型经 5 折交叉验证与网格搜索优化超参数。采用 SHAP 解释框架计算边际贡献，通过依赖图可视化核心因子的非线性响应曲线，识别关键阈值区间。

3 结果与分析

3.1 蓝绿空间退化类型特征

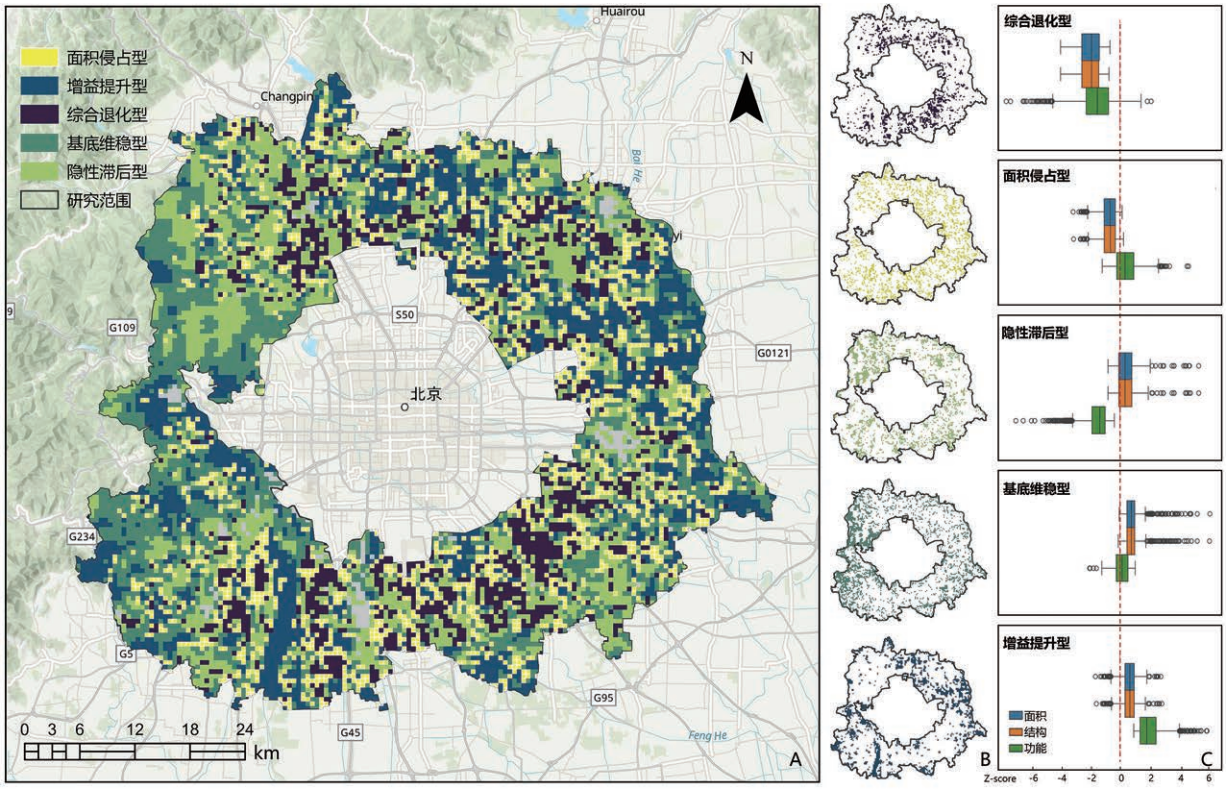
剔除研究期内蓝绿空间面积占比始终为 0 的稳定建设基质后，基于剩余 10 816 个有效网格进行聚类，经轮廓系数验证，当 K=5 时组间差异最大。因此界定出二绿地区蓝绿空间演变的 5 种典型模式，具体体现为“综合退化—面积侵占—隐性滞后—基底维稳—增益提升”的分异图谱（图 2）。“综合退化型”的面积、结构与功能同步下降；“面积侵占型”面积与结构减少但功能维持；“隐性滞后型”形态稳定但功能明显受抑；“基底维稳型”各项指标基本稳定；“增益提升型”整体改善。由于京津冀地区降水增加导致气候暖湿化，全域生态功能指标均值呈上升趋势，因此研究定义的功能退化并非指绝对值的衰减，而是在同等气候背景下，生态效益增幅低于全域基准的相对滞后与损失。

综合退化型数量最少但损失剧烈，集聚于亦庄、大兴、顺义等建设扩张前沿，面积缩减超 60%，且空间形态极度破碎化（ΔCONTIG－0.36），体现了大规模用地置换导致的生态基底显性消亡。面积侵占型多镶嵌于前者边缘，尽管同样受严重空间蚕食（ΔPLAND－35.1%），但功能仍维持在全域平均水平。易被忽视的隐性滞后型连片散布于研究区内，体现为形态稳定下的功能失耦。基底维稳型和增益提升型独立于上述退化梯度之外，前者各项指标均值随时间保持动态平衡，构成较为稳定的生态基底；后者在面积基本恒定下生态功能大幅提高，集聚于永定河、温榆河等生态廊道及大型郊野公园节点。

3.2 影响蓝绿空间退化的关键城市扩张因素

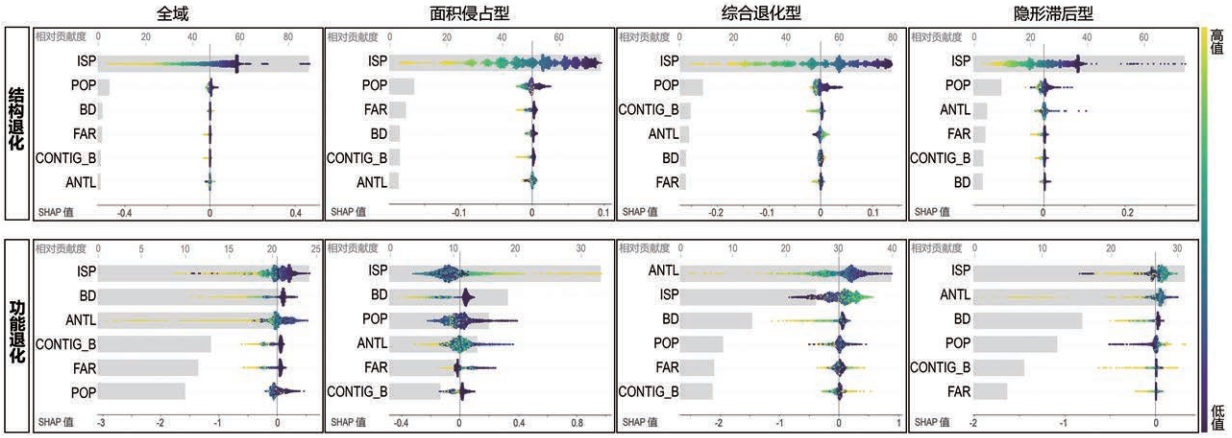
Pearson 相关分析显示，城市扩张与蓝绿空间面积退化呈明显线性负相关，反映了地表硬化与生态空间收缩的高度耦合。据此，后续重点挖掘结构与功能退化维度的潜在驱动特征，全域与分簇模型中各扩张变量的相对贡献度如图 3 所示：

全域尺度下，不透水面占比在结构退化中占主导，相对贡献度超 80%，体现出二维扩张与生态斑块复杂性及连通性变化的高度关联。功能维度的贡献结构呈多因子协同，不透水面占比贡献度降至 24.2%，建筑密度与夜间灯光强度分列二、三位。



注：A 蓝绿空间退化类型；B 各类型退化空间分布；C 不同蓝绿空间退化类型的多维特征。

图 2　北京二绿地区蓝绿空间退化类型特征



注：散点颜色表示特征变量的数值（黄色为高值，紫色为低值）；下方横轴为 SHAP 值，正值表示促进蓝绿空间状况改善的正向影响，负值表示负向影响（即退化）；上方横轴为各扩张因子的相对贡献度。

图 3　城市扩张特征对蓝绿空间退化的相对贡献

分簇模型进一步揭示了驱动机制的空间分异。结构维度中，不透水面占比在各退化模式下均保持稳定主导；功能退化则随分簇类型呈现层级特征。面积侵占型中，不透水面占比仍居首位；综合退化型中，社会经济扰动最为突出，平均夜间灯光强度的相对贡献度达 39.9%，跃升为主导因子，高于不透水面占比（25.7%）；隐性滞后型区域则呈现出不透水面占比（31.0%）与平均夜间灯光强度（28.3%）共同主导的格局。

3.3　城市扩张影响因素的边际效应与阈值特征

图 4 表明，两类退化的响应模式存在差异：结构退化表现为对单一因子的负向单调响应；功能退化则更为复杂，趋势曲线的非线性和离散度更强，且阈值区间在全域与各退化类型间存在分异。

结构维度上，不透水面占比变化（ΔISP）的影响趋势在全域与各分组中表现为一致的线性下降：随着 ΔISP 由负转正并持续增大，SHAP 值持续下降，未出现明显反转或拐点。各退化类型在结构维度的边际效应差异较小，ΔISP 始终占据主导；人口密度变化（ΔPOP）与平均夜间灯光强度变化（ΔANTL）等因子的 SHAP 值整体趋近于零，且仅在局部轻微波动，对结构退化的解释贡献有限。

功能方面，ΔISP 在全域尺度下超过约 0.2 后，开始呈现持续负向贡献。面积侵占型呈近似“U 型”特征：在约 0.2~0.4 区间表现为负向贡献，大于 0.4 后 SHAP 值逐步转正并上升，显示不透水面扩张在特定高强度区间并未持续触发功能退化。综合退化型曲线呈现“倒 U 型”：ΔISP 增至约 0.6~0.8 区间时 SHAP 值正向抬升，超过约 0.8 后退化效应重新增强。隐性滞后型中，ΔISP 跨越约 0.25 后，转为强烈的持续性负向响应。ΔANTL 的边际效应同样具有阶段性特征。全域尺度下，当 ΔANTL 进入约 10~40 区间后，SHAP 值为负且快速下降，功能退化大幅增强。综合退化型对夜间灯光强度最为敏感，ΔANTL 达到约 20 时，负向贡献迅速增强。建筑密度变化（ΔBD）也存在明显阈值。全域 ΔBD 增幅超过约 0.03 时开始显现负面影响；综合退化型中，ΔBD 超过约 0.15 后，SHAP 值波动幅度明显增大。

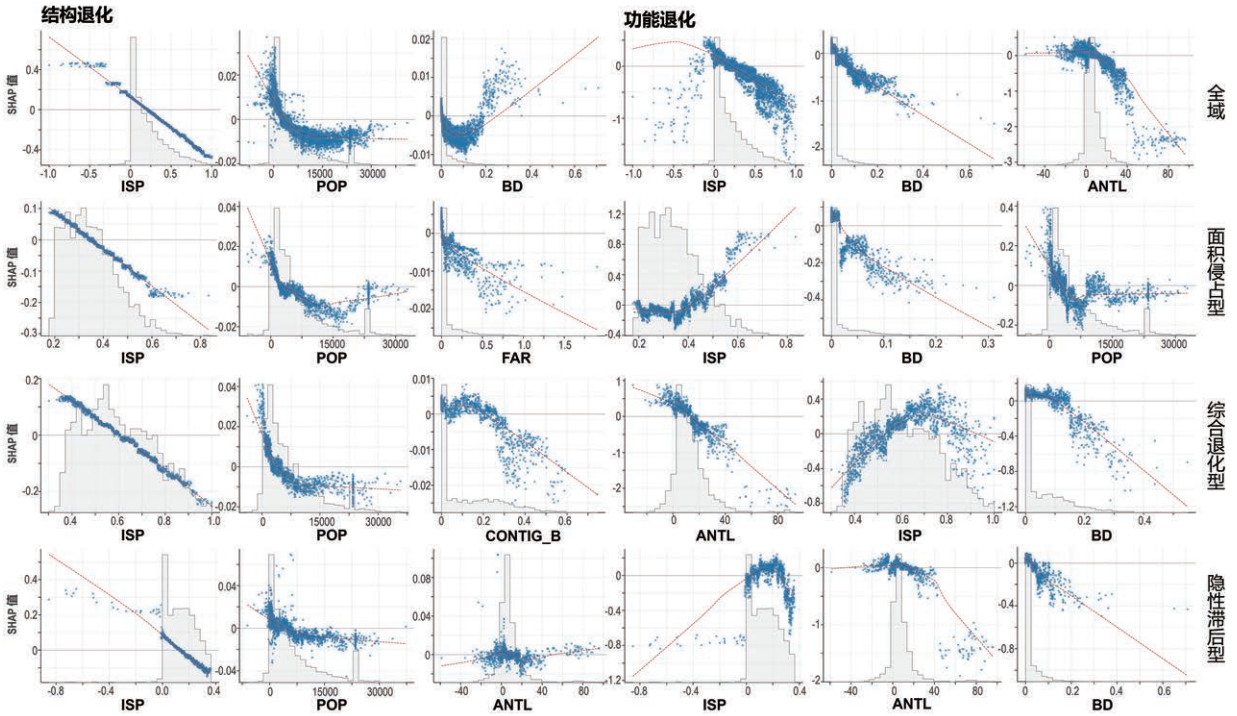


图 4 城市扩张特征与蓝绿空间退化的边际效应

4 讨论

4.1 二绿地区“扩张—退化”链条的机制

建设用地扩张对蓝绿空间的刚性挤压直接主导了面积与结构退化，其中功能退化呈现出多维扩张因素的非线性累积与组间差异。综合退化型中，不透水面胁迫趋于饱和，社会经济扰动具有放大效应；面积侵占型显示出建成环境与生态的潜在协同，这是新增建设伴随的绿色基础设施投入与管护 在一定区间内缓解功能衰退；隐性滞后型中，较低强度的建设即可触发功能负向响应，反映出该区域生态敏感性较高。值得注意的是，作为区域生态核心的西山地区，多表现为基底维稳型或隐性滞后型，其“滞后”反映了成熟生态系统在增量竞争中的稳态特征；而平原区则验证了近年来生态工程的积极成效。这一现象体现出二绿地区存量保育与增量修复的空间分异特征。

本研究的发现与近年来城市形态—生态效应关系研究的理论认知相一致[35-36]，并在绿化隔离地区这一特殊政策单元得到细化。二绿地区作为

受“减量发展”“留白增绿”等政策约束的城市空间，其“扩张—退化”链条折射出管控与扩张之间的复杂博弈。

4.2　基于算法诊断的阈值管控与分区优化策略

1）建立基于风险阈值的管控工具。全域 ΔISP 超过约 0.2、ΔBD 超过约 0.03，功能退化增强；综合退化型 ΔANTL 达约 20 是社会经济干扰的敏感点；ΔISP 超过约 0.25 是隐性滞后型须关注的建设预警阈值。鉴于生态复杂性与模型样本影响，上述阈值应被视为宏观弹性预警区间，而非微观地块的刚性物理红线。实际管控可建立“监测—诊断—响应”机制，结合生态补偿适度浮动。

2）推行基于退化分异的治理策略。综合退化型多为高密度建成区，建议划为重点“城市更新单元”，在增量受限条件下，通过“针灸式”微改造将蓝绿空间优化纳入详细规划与城市设计导则；面积侵占型应在建设强度上限内，通过绿线控制、海绵设施配置和景观品质提升，促成建设与生态协同；隐性滞后型治理关键在于功能提振，应强化对建筑密度、光污染和活动强度的过程管控；基底维稳与增益提升型中的结构性生态空间，应纳入生态红线或重要生态空间名录，强化其保育、连通与辐射缓冲作用。

4.3　展望

本研究仍存在若干局限。首先，未量化政策制度因子对“扩张—退化”的调节作用，文中仅进行了定性讨论。其次，基于首末两期时点差值的分析难以捕捉动态轨迹，未来宜引入长时序数据。第三，机器学习模型在揭示复杂生态过程时仍面临不确定性，SHAP 本质是相关性归因而非物理因果推断，阈值判读应视为概率性风险提示，局部机制仍需实地验证。最后，治理策略尚属框架性建议，下一步应探索其融入用地指标调整、城市设计及国土空间规划决策的具体路径。

5　结论

城市扩张胁迫下，绿化隔离地区蓝绿空间退化并非均质过程，而是表现出面积、结构与功能的多维类型分异与空间异质性规律。不同退化维度的驱动机制存在差异：面积与结构退化受不透水面扩张的刚性约束主导；功能退化受多因子协同胁迫，全域与分簇尺度下各扩张因子的相对贡献不同，体现出功能响应的复杂性与空间依赖性。此外，城市扩张对生态功能的胁迫存在阈值效应，各驱动因子边际效应呈现非线性特征，阈值区间因退化类型而异。研究揭示了高密度城市扩张背景下绿化隔离地区蓝绿空间“多维度退化—差异化驱动—非线性阈值响应”的内在机理，丰富了城郊生态空间演变的理论认知，可为超大城市绿化隔离地区精明调控提供借鉴。

参考文献

[1] LEE S, YOON H. Effects of greenbelt cancellation on land value: the case of Wirye New Town, South Korea[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2019, 41: 55-66.

[2] AMATI M, YOKOHARI M. Temporal changes and local variations in the functions of London's green belt[J]. Landscape and Urban Planning, 2006, 75(1/2): 125-142.

[3] 丁戎，栾博，廖双南，等. 波特兰大都市区开放空间的保护、利用及其启示[J]. 中国城市林业，2023，21(2)：160-165.

[4] 刘颂，沈培宇，柳迪子，等. 复杂适应系统视角下环城绿带“主体-环境”演进机制：以北京市绿隔为例[J]. 风景园林，2025，32(6)：78-85.

[5] 代云川，李迪强. 生态屏障的内涵、评价体系、建设实践研究进展[J]. 地理科学进展，2022，41(10)：1969-1978.

[6] 张凯旋. 公园城市背景下大城市环城生态公园带建设研究：以北京、上海、成都为例[J]. 北京规划建设，2024(4)：99-103.

[7] 葛韵宇，李雄. 基于碳汇和游憩服务协同提升的北京市第二道绿化隔离地区郊野公园环空间布局优化[J]. 北京林业大学学报，2022，44(10)：142-154.

[8] ZHONG Q Y, MA J, ZHAO B, et al. Assessing spatial-temporal dynamics of urban expansion, vegetation greenness and photosynthesis in megacity Shanghai, China during 2000-2016[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 233: 111374.

[9] 马淇蔚. 生态管控区城市扩张形态对生态系统服务价值的影响[J]. 中国城市林业，2024，22(6)：35-43.

[10] 李久林，刘俊豪，黄闯. 成渝城市群生态韧性与城市化耦合效应及未来情景模拟[J]. 生态学报，2025，45(23)：11520-11535.

[11] LI P X, CAO H. Comprehensive assessment on the ecological stress of rapid land urbanization per proportion, intensity, and location[J]. Ecosystem Health and Sustainability, 2019, 5(1): 242-255.

[12] DENG X Z, HUANG J K, ROZELLE S, et al. Impact of urbanization on cultivated land changes in China[J]. Land Use Policy, 2015, 45: 1-7.

[13]WU Z,CHEN R S,MEADOWS M E,et al.Changing urban green spaces in Shanghai:trends,drivers and policy implications[J].Land Use Policy,2019,87:104080.

[14]苏喆,钱雨果,华野毓,等.基于高分数据的北京市绿化隔离地区生态建设评价[J].生态学报,2025,45(18):9150-9162.

[15]葛韵宇,李雄.基于多源数据的北京市第二道绿化隔离地区生态系统支持服务与景观多样性关联研究[J].风景园林,2021,28(8):100-105.

[16]刘子晴,葛韵宇.北京第二道绿化隔离地区空间潜力分析及郊野公园选址研究[J].北京规划建设,2024(1):40-45.

[17]王思杰.城市游憩视角下北京二道绿隔郊野公园布局优化研究[D].北京:北京林业大学,2019.

[18]WANG Y H,ZHANG Q T,ZHANG J K,et al.Impact of 2D and 3D factors on urban flooding: Spatial characteristics and interpretable analysis ofdrivers[J].Water Research,2025,280:123537.

[19]姜睿原,陆海翔,瓦西里·科斯托夫,等.高温热浪条件下城市三维景观格局对大气颗粒物浓度的影响:以上海市为例[J].中国园林,2025,41(8):21-28.

[20]LIU QQ,HANG T,WU Y F.Unveiling differential impacts of multidimensional urban morphology on heat island effect across local climate zones: Interpretable CatBoost-SHAP machine learning model[J].Building and Environment,2025,270:112574.

[21]ZENG J,CAI YY,YANG C,et al.Revealing the impact patterns of urban morphology on land surface temperature in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area,China[J].Cities,2025,165:106147.

[22]ZHOU S Q,GENG X W,JIA W Y,et al.Towards climate-adaptive equality in coastal megacities:Assessing urban flooding risk disparities and nonlinear effect of multidimensional indicators through an interpretable Light GBM-SHAP framework[J].Sustainable Cities and Society,2025,132:106809.

[23]LIU Q Q,HANG T.Seasonal synergistic management of urban heat island effect and $PM_{2.5}$ pollution:insights from interpretable Light GBM-SHAP machine learning model[J].Environmental Impact Assessment Review,2026,116:108129.

[24]阮智杰,张智杰,徐玮,等.大尺度城市生态空间规划实施机制研究:以北京第二道绿化隔离地区减量提质规划为例[J].北京规划建设,2024(1):29-32.

[25]梁晨.转型时期城市边缘区的空间分异:发展逻辑映射与规划响应机制[J].城市规划,2022,46(7):78-86,118.

[26]YANG J,HUANG X.The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J].Earth System Science Data,2021,13(8):3907-3925.

[27]ZHANG Y C,ZHAO H M,LONG Y.CMAB:a multi-attribute building dataset of China[J].Scientific Data,2025,12:430.

[28]CHEN Z Q,YU B L,YANG C S,et al.An extended time series (2000-2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration[J].Earth System Science Data,2021,13(3):889-906.

[29]LLOYD C T,SORICHETTA A,TATEM A J.High resolution global gridded data for use in population studies[J].Scientific Data,2017,4:170001.

[30]JIA Y F,CHEN Z F,LU X H,et al.The degradation and marginal effects of green space under the stress of urban sprawl in themetropo litan area[J].Urban Forestry & Urban Greening,2024,95:128318.

[31]GUAN S Y,HU H H.Exploring the potential relationship between cooling green space and built-up area:analysis of community green space characteristics based on GWPCA[J].Building and Environment,2025,267:112190.

[32]WANG Y C,SHENG S,XIAO H B.The cooling effect of hybrid land-use patterns and their marginal effects at the neighborhood scale[J].Urban Forestry & Urban Greening,2021,59:127015.

[33]黄俊达,王云才.高密度城市扩张影响绿色基础设施降温效应的关键因素与阈值识别:以上海市为例[J].中国园林,2025,41(8):29-35.

[34]SU H Y,WANG Q X,QI Z X.Macro-scale urban form and extreme heat events:evidence from Monte Carlo simulation-based ensemble learning models[J].Sustainable Cities and Society,2025,130:106582.

[35]LI C,YUE S Y,LIU X,et al.Assessment of the coordinated relationship between blue-green space and urbanization in coastal mountain cities based on spatiotemporal evolution analysis: a case study in Qingdao,China[J].Ecological Indicators,2025,175:113586.

[36]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.