

陈实, 何明婵, 陈帅朋, 俞培孟, 刘文平. 武汉都市圈蓝绿空间游憩与生境服务权衡协同关系的城乡梯度响应及尺度效应[J]. 风景园林, 2026, 33 (5): 33-42.

武汉都市圈蓝绿空间游憩与生境服务权衡协同关系的城乡梯度响应及尺度效应

陈实 何明婵 陈帅朋 俞培孟 刘文平*

摘要：【目的】对于城乡梯度和空间尺度如何调制蓝绿空间游憩与生境服务之间的权衡协同关系，目前仍缺乏系统认识，严重制约了都市圈蓝绿空间的精准规划与管理。本研究旨在融合“城乡梯度-空间尺度”双视角，系统揭示都市圈蓝绿空间游憩与生境服务间权衡协同关系的空间异质性及尺度依赖性。【方法】以武汉都市圈为例，综合运用最大熵（maximum entropy, MaxEnt）模型、生态系统服务与权衡综合评估（integrated valuation of ecosystem services and trade-offs, InVEST）模型和广义加性模型（generalized additive model, GAM）等方法，构建了蓝绿空间游憩与生境服务间权衡协同关系的“梯度-尺度”综合分析框架。【结果】研究发现：1）生境服务沿城乡梯度衰减或增强的梯度距离拐点均滞后于游憩服务，在中心城市级、地市级和区县级梯度中分别滞后 7.58 km、7.74 km 和 2.89 km；2）游憩与生境服务之间的空间权衡协同关系表现出明显的尺度依赖性，50~60 km² 是二者由空间协同关系向空间权衡关系转换的关键尺度；3）游憩与生境服务之间的空间权衡协同关系及其转换对城乡梯度的响应阈值受空间尺度和城市行政等级调控。【结论】本研究可为都市圈蓝绿空间的分级分类精准规划与协同管理提供科学依据，有助于推动游憩利用与生态保护的动态平衡及区域可持续发展。

关键词：都市圈；蓝绿空间；游憩服务；生境服务；权衡协同关系；城乡梯度；尺度效应

基金项目：国家自然科学基金面上项目“都市圈绿色空间生物流与游憩流多层次嵌套交互协调机制及一体化优化”（编号 32471948）；国家自然科学基金面上项目“城乡统筹背景下绿色空间多层次游憩流网络协同机制及布局优化”（编号 32171858）；湖北省自然科学基金联合基金重点项目“公园城市生态价值实现的多尺度空间耦合优化研究”（编号 2025AFD385）；中央高校基本科研业务经费专项“绿色空间景观服务流跨尺度级联机制与自适应协同优化”（编号 2662025YLPY004）；湖北省建设科技计划项目“基于多源大数据的城市蓝绿空间游憩服务效率与韧性提升技术”（编号 JK2024101）

中图分类号：TU986

文章编号：1673-1530(2026)05-0033-10

收稿日期：2026-01-29

文献标识码：A

DOI：10.3724/j.fjyl.LA20260069

修回日期：2026-04-13

作为中国新型城镇化的核心载体与人口高密度集聚区，都市圈在创造巨大经济活力的同时，也对生态空间造成了前所未有的持续胁迫^[1-2]。以湖泊、河流和绿地为代表的蓝绿空间，是都市圈关键的生态基底与公共开敞空间^[3]，不仅承担了生物多样性维持等重要生态功能，也逐渐成为满足城乡居民亲近自然、休闲游憩需求的核心载体^[4-5]。然而，都市圈蓝绿空间的规划与管理长期面临一个核心矛盾，即游憩服务的强化往往以生境服务的削弱为潜在代价^[6]。这源于2类服务的供给机制差异，即游憩服务受人类需求偏好与资源供给能力的综合影响^[7]，而生境服务的维系则依赖于生态过程的完整性与低人为干扰^[8]。如何科学认知并协调这一矛盾，已成为都市圈可持续发展与高品质人居环境营建的关键

议题^[9-10]。

都市圈从城市核心到外围乡村，存在土地利用、开发强度与生态本底的连续梯度变化，导致不同类型生态系统服务沿城乡梯度呈现显著的空间异质性^[11]。大量研究表明，随着与城市中心距离的增加，生境等支持服务通常呈现非线性分布变化^[12-13]，而游憩等文化服务则可能因可达性降低而衰减^[14]。然而，现有研究多聚焦于服务供给量本身^[15]，未能系统揭示不同城市规模下的响应模式差异，也尚未厘清服务之间的权衡协同关系如何沿城乡梯度变化^[16-17]。此外，最新的研究表明，生态系统服务之间的权衡协同关系具有明显的尺度依赖性，同一组服务在不同空间尺度上的权衡协同关系及其驱动机制可能截然不同^[18-19]。但现有研究尚未深入揭示这种尺度效应是否

文章亮点：

- 1、揭示了都市圈蓝绿空间游憩与生境服务在不同行政等级城市城乡梯度上的响应差异，发现生境服务的梯度响应阈值整体滞后于游憩服务，且城市行政等级越低相对滞后程度越大。
- 2、揭示了游憩与生境服务间空间权衡协同关系的尺度效应，发现 50~60 km² 是二者由空间协同关系向空间权衡关系转换的关键尺度。
- 3、构建了“梯度-尺度”交互分析框架，揭示了空间尺度对游憩与生境服务间权衡协同关系的梯度调制影响，可为都市圈蓝绿空间分级分类精准规划提供支撑。

以及如何随城乡梯度发生规律性的空间变化，即“尺度效应”本身的空间异质性未被充分探讨^[20-21]。

更关键的是，当前研究忽略了生态系统服务在总量权衡与空间权衡2个维度上的梯度分异与尺度差异^[22]，导致难以突破实践中“统计上协同、空间上冲突”的治理困境。面对国土空间规划“总量约束”与“格局优化”并重的现实需求^[23]，亟需阐明生态系统服务在数量配置与空间布局上的尺度响应规律。已有研究发现，随着分析尺度变化，部分服务间的协同关系可能逆转为权衡竞争^[18]，而某些权衡关系则可能在特定尺度窗口内转化为协同增益^[19]。这种差异化响应意味着规划干预存在关键尺度阈值，越过阈值后同样的管控措施可能产生截然相反的效果。精准识别并

量化这些尺度阈值,是实现都市圈国土空间规划总量约束与格局优化精准施策的科学前提。

武汉都市圈作为承载数千万人口的国家级都市圈之一,其城镇发展空间结构呈现典型的“强核心-多层次”特征^[24]。近年来,随着居民近自然游憩需求激增^[25-26],协调武汉都市圈蓝绿空间的游憩与生境服务变得尤为迫切。本研究以武汉都市圈为例,从数量与空间2个维度揭示蓝绿空间游憩与生境服务间权衡协同关系的城乡梯度与空间尺度响应特征,为不同尺度下的生态系统服务总量调控与空间优化配置提供科学支撑。基于此,本研究致力于回答3个递进的科学问题:1)游憩与生境服务之间的数量权衡协同关系沿城乡梯度呈现怎样的非线性响应规律?2)游憩与生境服务之间的空间权衡协同关系具有怎样的尺度依赖性?3)城乡梯度与空间尺度如何共同影响游憩与生境服务之间的权衡协同关系?通过回答上述问题,有望推动都市圈蓝绿空间规划从模糊的“协调发展”理念,走向可量化、可定位、可实操的精准治理。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况与数据来源

武汉都市圈地处湖北省东部,国土面积约5.78万km²,是以武汉市为中心,向外联结鄂州、孝感、黄冈等8个城市(其中5个地级市、3个省直管县级市),共辖48个县(市、区)的协同发展区域(图1)。武汉都市圈生态本底优越,河湖湿地众多,分布有大别山、幕阜山等重要生态源地,其差异化城镇化进程、多层次空间结构与优越生态本底并存的区域特征,呈现了不同城乡梯度和空间尺度下游憩需求与生境保护之间的真实张力与协同潜力,为解析游憩与生境服务间权衡协同关系的梯度与尺度响应特征提供了理想样本。

蓝绿空间是指由自然或半自然的水体与绿地共同构成的开放空间,可以提供生境维持、雨洪调蓄、气候调节、休闲游憩与景观美学等多项生态系统服务^[27],是支撑区域生态安全与人类福祉的关键空间载体。依据自然

资发〔2023〕234号《国土空间调查、规划、用途管制用地用海分类指南》,本研究界定的蓝色空间包括武汉都市圈内的河流、湖泊、水库、湿地等水域,绿色空间包括绿地与开敞空间用地、林地、草地等除耕地以外的植被覆盖区域^[28-29]。本研究从中国年度土地覆盖数据集(Annual China Land Cover Dataset, CLCD)^[30]提取了武汉都市圈蓝绿空间作为评估对象。同时,获取了数字高程模型、归一化植被指数、道路和兴趣点(point of interest, POI)作为量化生境与游憩服务的环境变量数据源;收集了湖北省A级景区名录、全国重点文物保护单位名录、国家级传统村落名录和自然保护区名录数据,作为游憩服务样本点数据。以上数据基准年均均为2022年(表1)。为确保分析的一致性,所有栅格与矢量数据均统一至WGS_1984_UTM_Zone_50N投影坐标系,并裁剪至武汉都市圈边界范围。

1.2 研究框架

为揭示武汉都市圈蓝绿空间游憩与生境服务间权衡协同关系的空间异质性与尺度依赖性,本研究构建了一个整合“城乡梯度”与“空间尺度”的综合分析框架。该框架包含3个步骤。首先,基于最大熵(maximum entropy, MaxEnt)模型和生态系统服务与权衡综合评估(integrated valuation of ecosystem services and trade-offs, InVEST)模型,分别量化游憩服务与生境服务。随后,利用Spearman相关性分析,解析2类服务在数量层面的权衡协同关系,并结合全局与局部空间自相关分析揭示其空间层面的权衡协同格局。最后,采用广义加性模型(generalized additive model, GAM)分别拟合“数量”和“空间”维度的权衡协同关系沿城乡梯度的非线性变化规律,识别关键梯度阈值,并引入多尺度网格分析检验空间权衡协同关系的尺度依赖性(图2)。由此,系统回答“权衡协同关系如何响应梯度变化”以及“空间尺度如何调制梯度响应曲线”2个关键问题。

1.3 数据分析

1.3.1 游憩与生境服务量化

游憩服务不仅取决于地形、植被等自然资源禀赋,更受可达性、设施密度等转化利

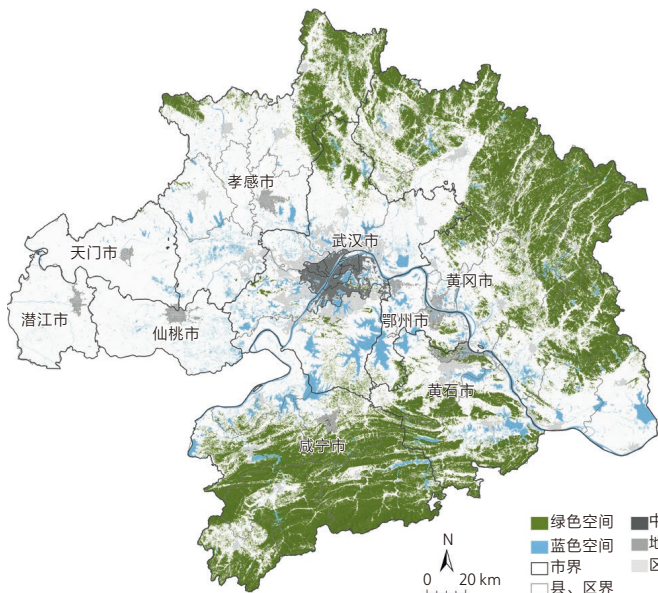
用条件影响^[14,31]。MaxEnt模型能够有效处理多变量间的非线性关系,可以基于游憩资源样本点的空间分布与环境变量之间的关系预测全域蓝绿空间的游憩服务潜力^[32]。选取武汉都市圈内A级景区、全国重点文物保护单位、国家级传统村落和省级及以上自然保护地作为游憩资源^[33]的代理点(共552个),随机抽取其中70%作为训练样本用于构建MaxEnt模型,剩余30%作为验证样本用于评估模型精度。该模型环境变量的选取主要考虑本底资源潜力和市场转化条件2个维度^[31]。基于自然景观禀赋、生态质量与视觉丰富性,本底资源潜力维度选取高程^[34]、坡度^[33]、归一化植被指数^[35]、距水体距离^[35]、景观多样性^[36]和土地覆被类型^[36]6个变量;围绕资源潜力转化为实际游憩服务的社会经济条件,市场转化条件维度选取服务设施密度^[35](基于餐饮、零售、住宿等POI的核密度估算)和可达性^[36](距各级道路的最近距离)2个变量。参考土地覆被与生态系统服务研究中平衡空间细节与计算效率的常用粒度^[37],所有变量均重采样至100m空间分辨率,并进行了多重共线性检验(方差膨胀因子VIF<5)。模型性能通过受试者工作特征曲线下面积(area under curve, AUC)进行验证。采用自举法(Bootstrap)重复运行模型10次得到的AUC均值为0.782(标准差为0.007),表明模型具有较好的预测能力与泛化性^[38]。

生境服务采用InVEST模型中的生境质量(habitat quality)模块进行量化^[39]。该模块通过评估生境类型对威胁源的敏感性与暴露程度,综合评估生境质量,进而表征生境服务水平,计算式

$$Q_{xj} = H_j \times \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right],$$

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left(\frac{\omega_r}{\sum_{r=1}^R \omega_r} \right) \times r_y \times i_{xy} \times \beta_x \times S_{jr}.$$

式中, Q_{xj} 为生境类型 j 栅格 x 的生境质量; z 表示归一化常量,其参数为模型默认值; k 为半饱和和常数,默认值为0.5; D_{xj} 为生境类型 j 中栅格 x 的生境退化度; H_j 为生境类型 j 的生境适宜度; R 为胁迫因子数量; Y_r 为威胁源 r 的栅格单元总数; ω_r 为威胁源 r 的权



1 研究区域
Study area

2 研究框架
Research framework

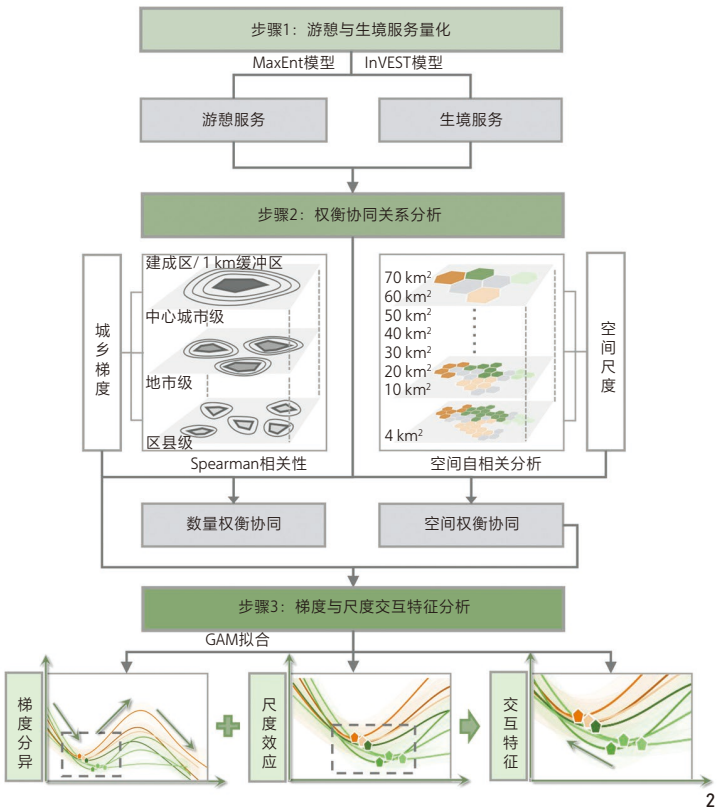


表1 数据来源及说明
Tab. 1 Data sources and explanation

数据名称	数据来源	数据用途	类型
土地覆盖类型	中国土地覆盖数据集 (zenodo.org/record/8176941/)	蓝绿空间、城市建成区范围界定、生境服务量化	30 m空间分辨率栅格
	欧洲航天局全球陆地覆盖数据中心 (maps.elie.ucl.ac.be/CCI/)	环境变量土地覆被类型划分、景观多样性量化	300 m空间分辨率栅格
湖北省A级景区名录	湖北省文化和旅游厅 (wlt.hubei.gov.cn/)	游憩服务样本点数据源	矢量点
全国重点文保单位名录	国家文物局 (www.ncha.gov.cn/)	游憩服务样本点数据源	矢量点
国家级传统村落名录	中国传统村落数字博物馆 (www.dmctv.cn/)	游憩服务样本点数据源	矢量点
自然保护地名录	湖北省林业局 (lyj.hubei.gov.cn/)	游憩服务样本点数据源	矢量点
数字高程模型	地理空间数据云平台 (www.gscloud.cn/)	环境变量高程、坡度量化	30 m空间分辨率栅格
归一化植被指数	国家生态科学数据中心 (www.nesdc.org.cn/)	环境变量归一化植被指数量化	30 m空间分辨率栅格
道路	开放街道地图 (Open Street Map, OSM, openstreetmap.org)	环境变量可达性量化	矢量线
POI	高德地图开放平台 (lbs.amap.com/)	环境变量服务设施密度量化	矢量点

重； r_y 为威胁源 r 中栅格 y 的胁迫值； β_x 为栅格 x 的抗干扰水平； S_{jr} 表示生境类型 j 对威胁源 r 的敏感性； i_{xy} 为栅格 y 的胁迫值 r_y 对生境栅格 x 的胁迫水平。

1.3.2 城乡梯度划分与数量权衡协同分析

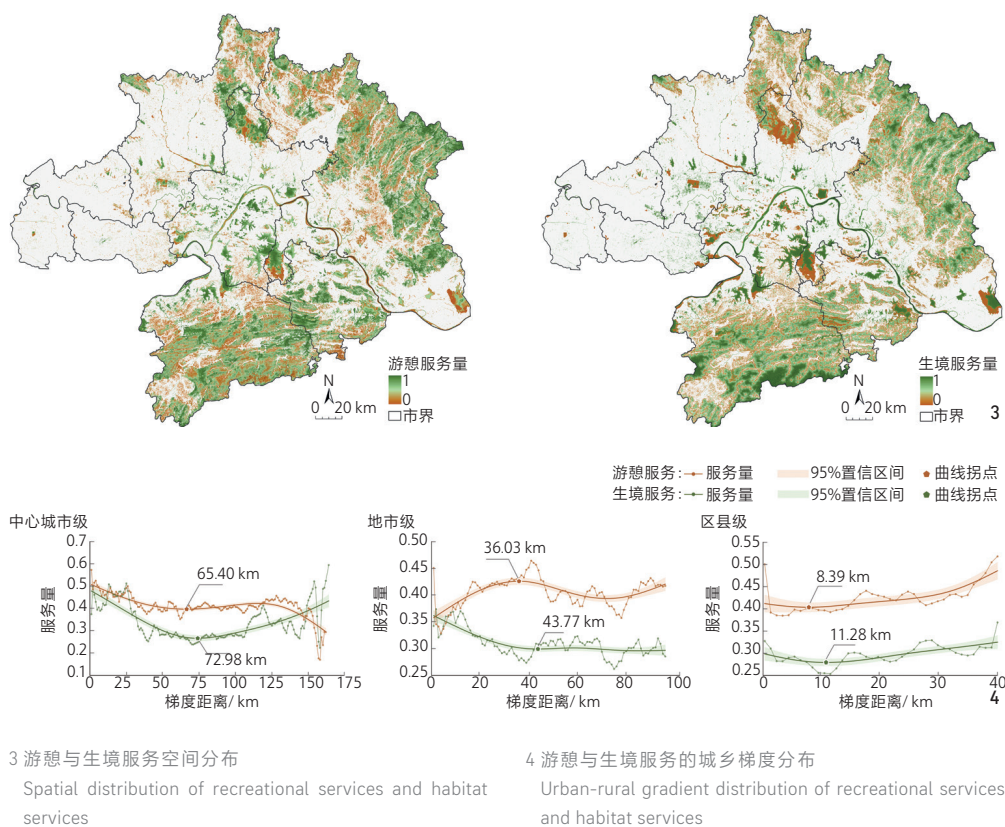
为揭示游憩服务与生境服务供给量统计相关性的城乡梯度响应规律，构建不同行政等级城市的连续城乡梯度序列。具体而言，以3类城市（武汉市主城区、地级市城区和省直管县级市城区、区县城区）建成区边界

为基线，以1 km为间隔向外生成系列缓冲区，构建连续的城乡梯度序列。为确保梯度的相对独立性，在地市级分析中剔除武汉主城区范围，在区县级分析中剔除所有地市级及以上主城区范围。在每个梯度缓冲区内，以100 m×100 m栅格为基本单元，提取每个单元内游憩服务与生境服务值。采用Spearman相关性分析计算每个缓冲区内2项服务的供给总量权衡协同关系。相关性系数为正表示协同，为负表示权衡，其绝对值大小反映相

关性强度。

1.3.3 多尺度网格构建与空间权衡协同分析

为揭示游憩服务与生境服务间空间权衡协同关系的尺度效应，兼顾管理现实与统计需求，构建从4 km²到70 km²的分析网格序列（包含4 km²、10 km²、20 km²、30 km²、40 km²、50 km²、60 km²、70 km²共8个尺度）。其中，下限4 km²约等于研究区内行政村/社区的平均面积，上限70 km²约等于研究区内乡镇/街道的平均面积^[21]。在此基础上，



计算各尺度下 2 项服务的全局 Moran's I 指数, 判断其空间集聚性的尺度变化。进而, 采用双变量局部空间自相关 (local Moran's I) 分析, 识别各尺度网格单元内 2 项服务之间的空间权衡协同关系类型。通过计算, 每个尺度下 2 项服务之间的空间权衡协同关系可划分为 5 种类型, 即“高游憩-高生境”协同型、“高游憩-低生境”权衡型、“低游憩-高生境”权衡型, 以及“低游憩-低生境”型和空间关系不显著类型。统计各尺度下不同类型区域的面积占比以及逐尺度、跨尺度下类型之间的转换面积占比, 以此揭示空间权衡协同关系的尺度依赖性。其中, 逐尺度转换用于揭示空间权衡协同关系在相邻尺度之间的变化特征, 跨尺度转换用于揭示空间权衡协同关系在非相邻尺度间的变化特征。

1.3.4 梯度与尺度交互特征分析

采用 GAM 来拟合非线性响应关系并检验梯度与尺度的交互特征。首先, 利用 GAM 分别拟合游憩服务值、生境服务值以及二者 Spearman 相关系数随城乡梯度距离变化的平滑曲线, 识别关键梯度拐点阈值。其次, 将

空间权衡协同类型面积占比和转换面积占比分别作为响应变量, 将城乡梯度距离和分析尺度作为解释变量, 构建 GAM。通过观察“梯度距离”的平滑函数曲线形状如何随“分析尺度”的变化而发生系统性偏移 (如峰值/谷值对应的梯度距离是否前移或后移), 来定量揭示空间尺度对城乡梯度响应曲线的影响。所有 GAM 分析均使用 Python 中的“pygam”库完成, 基函数数量与平滑参数通过广义交叉验证 (generalized cross-validation, GCV) 准则优化选择。

2 游憩与生境服务权衡协同关系的城乡梯度特征

2.1 服务空间分布与梯度响应

武汉都市圈蓝绿空间的游憩与生境服务总体呈现“中心游憩服务集聚、外围生境服务高地”的梯度错位格局 (图 3)。游憩服务高值区 (高于均值) 主要分布于武汉市建成区外围的风景游憩带, 以及都市圈南部、北部与东北部山林地区, 占蓝绿空间总面积的 50.68%; 生境服务高值区则集中于大别山区、

幕阜山区两大生态屏障及武汉市周边的梁子湖、斧头湖等大型湖泊, 占蓝绿空间总面积的 36.76%。

沿不同行政等级城市的城乡梯度, 游憩与生境服务的分布差异明显 (图 4)。在中心城市级梯度上, 2 类服务均随距中心城市距离增加而快速衰减, 但生境服务由降转升的拐点 (72.98 km) 相比游憩服务 (65.40 km) 滞后 7.58 km, 相对滞后约 11.59%, 表明高强度人类活动对生境的空间影响梯度更大。在地市级城乡梯度上, 游憩服务随梯度距离增加先快速增长, 至 36.03 km 后转为下降; 而生境服务则先快速下降, 至 43.77 km 后趋于平稳, 较游憩服务的梯度拐点滞后 7.74 km, 相对滞后约 21.48%。这意味着, 地市级城市近郊区域 (<36.03 km) 是游憩需求与生境保护冲突最激烈的地带。在区县级城乡梯度上, 2 项服务均呈现出先缓慢衰减后缓慢增长的趋势, 但生境服务由降转升的距离阈值拐点 (11.28 km) 较游憩服务 (8.39 km) 滞后 2.89 km, 相对滞后约 34.45%。总体而言, 城市行政等级越低, 生境服务相较于游憩服务的梯度滞后效应越突出。

2.2 服务数量权衡协同的梯度特征

在不同行政等级城市的城乡梯度上, 游憩与生境服务之间的供给总量关系均呈现出一致的变化规律, 即随着城乡梯度距离 (距建成区距离) 的增加, 二者由权衡关系快速转变为协同关系 (图 5)。其中, 在中心城市级, 游憩与生境服务由权衡关系转变为协同关系的梯度距离阈值为 7.33 km, 约为地市级 (3.12 km) 的 2.3 倍和区县级 (2.50 km) 的 2.9 倍。游憩与生境服务协同相关性达到第一个峰值的梯度距离分别出现在距中心城市级、地市级和区县级建成区的 38.17 km、21.06 km 和 11.13 km 处。这意味着在行政等级较低的城市周边, 游憩与生境服务可在相对更为紧凑的空间范围内实现双赢。

3 游憩与生境服务权衡协同关系的尺度效应

3.1 空间权衡协同类型的尺度效应

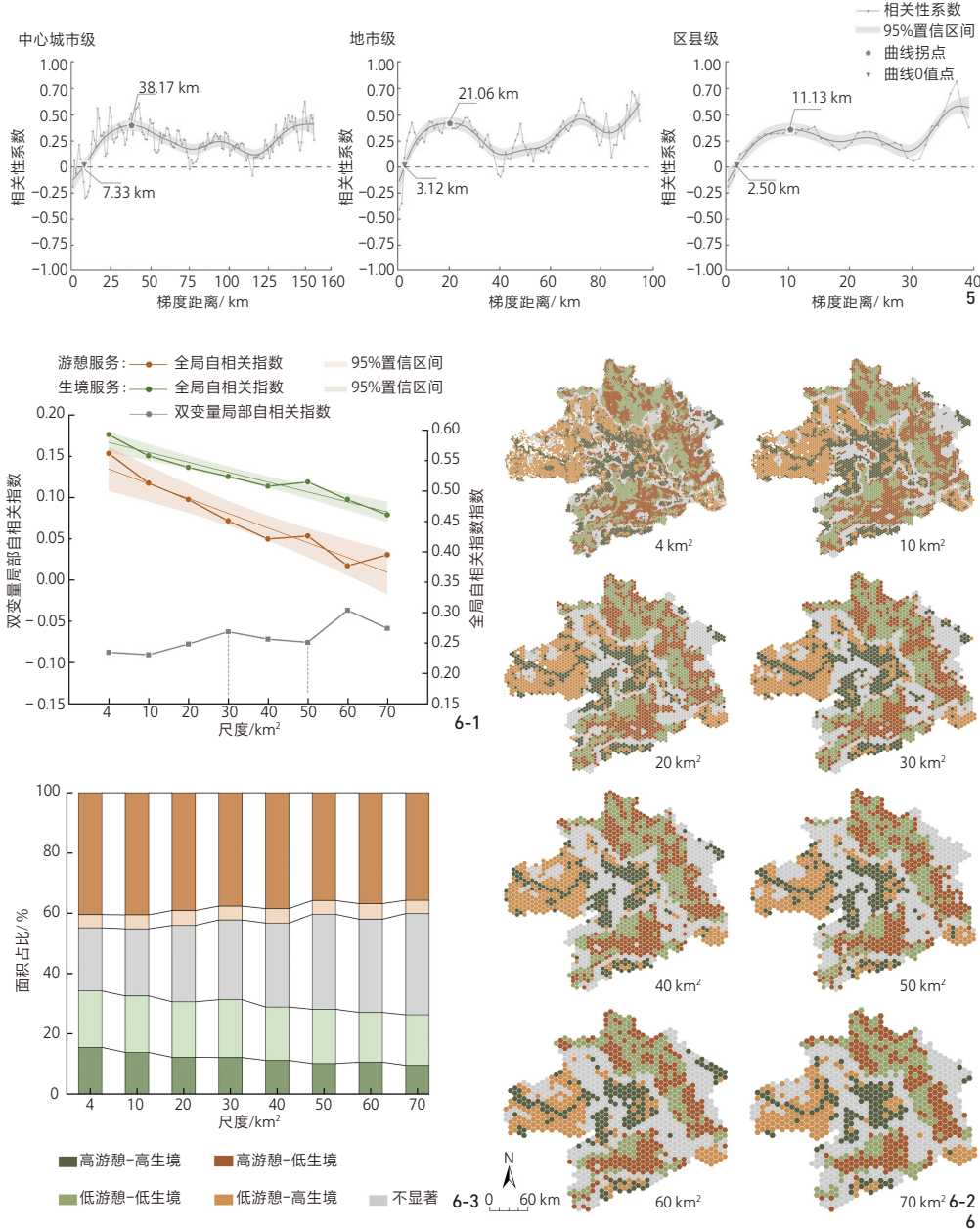
全局与局部空间自相关分析结果共同揭

示了游憩与生境服务间权衡协同关系对空间尺度的复杂响应规律（图 6-1）。2 项服务的全局自相关指数均随空间尺度扩大而递减，表明空间粒度的增大会逐渐平滑局部异质性。进一步对比发现，游憩服务的自相关指数随尺度增大的下降速率与降幅均大于生境服务，这意味着游憩服务对空间尺度的敏感性更高，其空间分布的高度集聚性在小尺度上更能被有效识别，反映出人为游憩活动对局部尺度的依赖程度明显高于自然生境分布。而双变量局部空间自相关指数在所有空间尺度下均为负值，表明游憩与生境服务在空间上总体呈现权衡格局。但值得注意的是，随空间尺度增大，游憩与生境服务的局部自相关指数（负值）在 30 km² 空间尺度下快速增大（向 0 靠近），在 30~50 km² 空间尺度区间总体保持稳定，超过 50 km² 后则又再次增长（趋近于 0）。这一变化表明，空间权衡强度并非随尺度单调变化，而是存在明确的尺度阈值效应，30~50 km² 空间尺度区间是二者权衡关系的相对稳定尺度，规划干预在该尺度下可获得最可预期的效果。

从不同尺度游憩与生境服务局部自相关类型空间分布看（图 6-2），在 30~50 km² 尺度区间，空间自相关结果最为稳定。30 km² 尺度分析结果显示，游憩与生境服务“高游憩-高生境”协同型主要分布于武汉市主城区外围郊野地带及汉江沿岸，占蓝绿空间总面积的 12.14%；“高游憩-低生境”权衡型则主要分布于研究区东部大别山与南部幕阜山山麓，占比 37.65%；“低游憩-高生境”权衡型集中分布于中西部江汉平原，占比 4.58%，表明游憩服务高值区更多围绕生境服务低值区分布。从空间权衡协同类型的面积占比变化来看（图 6-3），“高游憩-高生境”协同型的降幅最大，面积占比从 4 km² 尺度下的 15.48% 降至 70 km² 尺度下的 9.53%；而“高游憩-低生境”权衡型面积占比从 4 km² 尺度下的 40.45% 降至 70 km² 尺度下的 35.73%。可见，空间尺度扩大对游憩与生境服务空间协同关系的影响远大于对空间权衡关系的影响。

3.2 空间权衡协同关系的尺度转换

游憩与生境服务之间的空间权衡协同关



5 相关性系数的城乡梯度分布

Urban-rural gradient distribution of correlation coefficients

6 游憩与生境服务空间权衡协同的尺度效应

Scale effects of spatial trade-offs and synergies between recreational services and habitat services

6-1 多尺度游憩与生境服务空间自相关指数

Multi-scale spatial autocorrelation indices of recreational services and habitat services

6-2 多尺度游憩与生境空间权衡协同类型分布

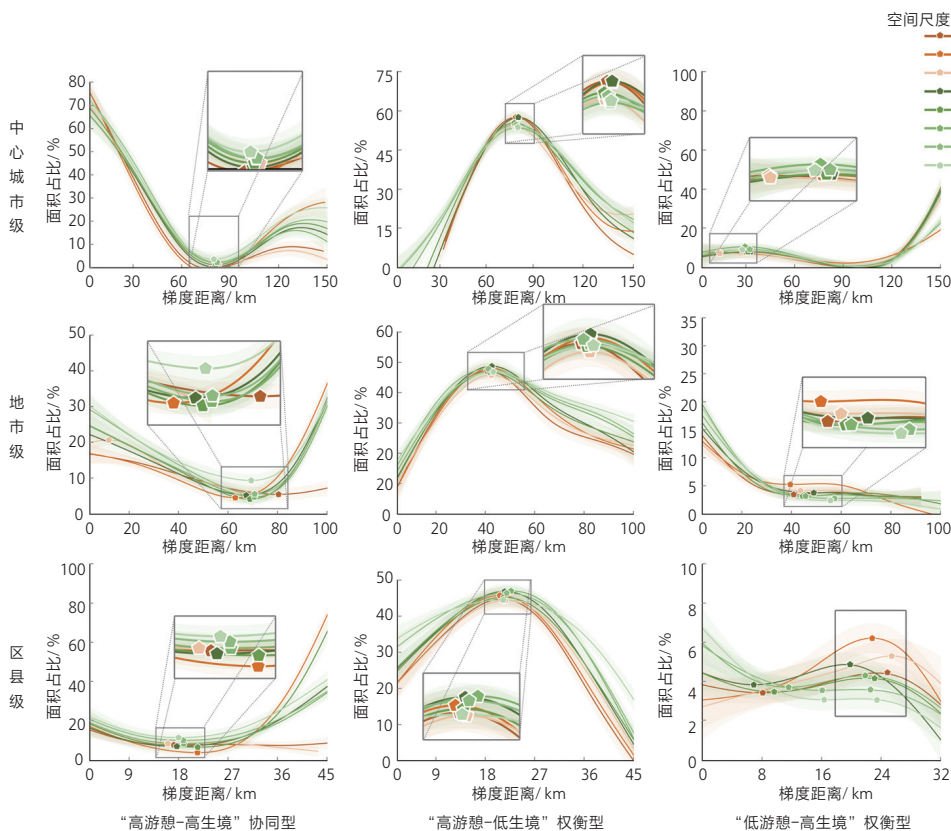
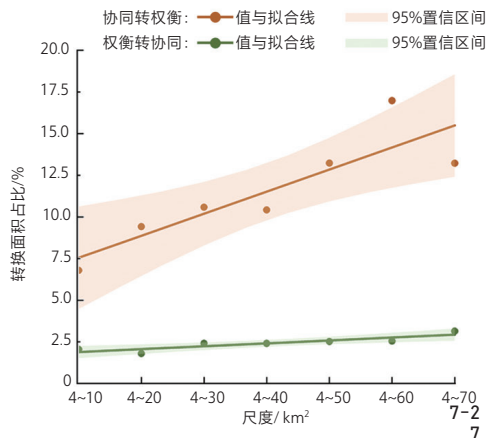
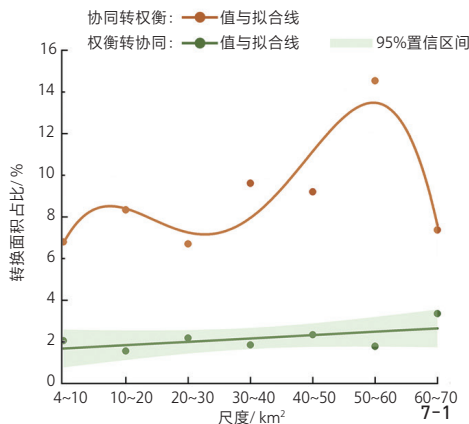
Multi-scale type distribution of spatial trade-offs and synergies between recreational services and habitat services

6-3 多尺度游憩与生境服务空间权衡协同类型面积占比

Multi-scale area proportions of spatial trade-off and synergy types between recreational services and habitat services

系转换逐尺度分析结果显示（图 7），随尺度逐渐增大，游憩与生境服务由空间协同关系向空间权衡关系转换的面积占比呈波动增加趋势，转换面积占比在 50~60 km² 的尺度转换中最大（14.73%），这意味着尺度提升会“掩盖”局部的空间协同关系，反映出更宏

观层次的资源竞争格局，但存在明显的尺度阈值效应。而 2 项服务由空间权衡关系向空间协同关系转换的面积占比则随尺度扩大而呈现小幅线性增加，表明在大尺度整合下，部分原本因局部冲突而被判定为权衡的区域，可能在更宏观的空间单元中呈现出功能协同



7 空间权衡协同关系转换的逐尺度 (7-1) 与跨尺度 (7-2) 面积占比
Area proportions of transitions between spatial trade-off and synergy relationships: scale-by-scale (7-1) and cross-scale (7-2) comparisons

8 多尺度游憩与生境服务空间权衡协同类型的城乡梯度分布
Multi-scale urban-rural gradient distribution of spatial trade-off and synergy types between recreational services and habitat services

特征,反映了尺度提升对空间关系的“整合调节”作用。这类转换所涉及面积占比小,说明权衡关系在尺度变化中具有较强惯性,总体不易被逆转为协同关系。空间权衡协同关系转换的跨尺度分析结果显示,游憩与生境服务由空间协同关系向空间权衡关系的转换面积占比随尺度跨幅增加呈现明显的

线性递增趋势,表明跨尺度转换进一步放大了尺度效应,协同关系的可延续性较差;而由空间权衡关系向空间协同关系的转换面积占比则总体保持稳定,不随尺度扩增而明显增加,表明空间权衡关系一旦形成,其转为空间协同关系的可能性较为有限,表现出较强的空间格局稳定性。

4 游憩与生境服务权衡协同关系的“梯度-尺度”交互特征

4.1 逐尺度交互特征

游憩与生境服务间不同类型的空间权衡协同关系,均表现出明显的非线性梯度响应差异和空间尺度调制特征(图8)。“高游憩-高生境”协同型在中心城市级梯度上未表现出明显的尺度效应,但在地市级和区县级梯度上,随着空间尺度增大,梯度距离响应阈值总体前移。具体而言,“高游憩-高生境”协同型面积占比随地市级梯度距离增加呈现先降后升的非线性变化,其转折阈值由4 km²尺度的69 km小幅前移至60 km²尺度的62 km;而在区县级中,该转折阈值则由4 km²尺度的17 km前移至60 km²尺度的20 km。这表明,在较低行政等级城市的城乡梯度上,空间尺度的扩大能够在更邻近建成区距离内触发游憩与生境协同关系的正向转变。“高游憩-低生境”权衡型在各级行政等级城市的城乡梯度上均未表现出明显的尺度响应差异,表明该类型权衡关系主要由梯度位置所决定,尺度调制作用相对有限。“低游憩-高生境”权衡型在中心城市级与地市级城乡梯度上均表现出明显的尺度响应差异。在中心城市级,该权衡关系在50 km²尺度的梯度响应距离最小(11 km),其余尺度的响应距离阈值相近(28~32 km);而在地市级,则呈现出随空间尺度增加、梯度响应距离阈值依次逐渐提前的趋势。这表明在较高城市行政等级,尺度对权衡关系空间位置的影响存在阈值效应。在区县级城乡梯度上,“低游憩-高生境”权衡型在60 km²尺度中的梯度响应变化幅度最大,在40 km²尺度中的梯度响应距离最小(21 km),表明空间尺度对该行政等级城市下的“低游憩-高生境”权衡型的调控作用更加显著。

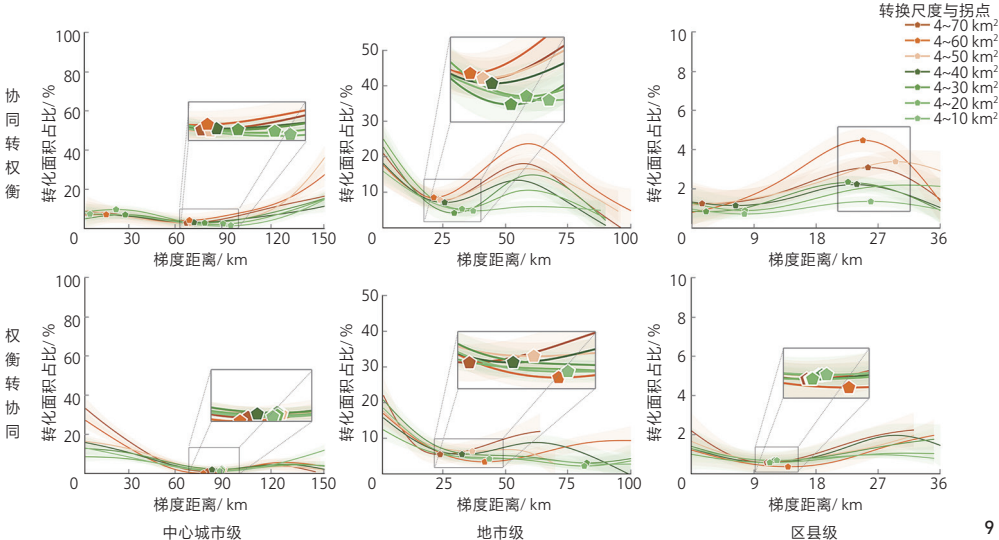
4.2 跨尺度交互特征

在不同行政等级城市的城乡梯度上,游憩与生境服务间空间权衡协同关系的跨尺度转换呈现出明显的差异特征(图9)。在中心城市级4~10 km²尺度的跨幅下,当城乡梯度距离超过94 km时,游憩与生境服务由空间协同关系开始向空间权衡关系大量逆转,且

随着尺度跨幅增大，该逆转的梯度距离阈值逐渐前移，在 4~70 km² 尺度跨幅下前移至 64 km。在中心城市级城乡梯度上，空间权衡关系向空间协同关系的跨尺度转换亦表现出相似的梯度规律，进一步表明尺度扩展会放大中心城市城区周边游憩与生境服务协同关系的脆弱性。在地市级城乡梯度上，4~10 km² 尺度跨幅分析表明，当梯度距离超过 36 km 时，游憩与生境服务由空间协同关系向空间权衡关系的转换明显增强；该梯度阈值随着尺度跨幅增大而逐渐减小，在 4~70 km² 尺度跨幅下前移至 21 km；表明尺度跨幅增加会显著压缩游憩与生境服务之间协同关系的稳定区间，使空间冲突出现的位置向城市中心方向前移。在地市级城乡梯度上，由空间权衡关系向空间协同关系转换的梯度距离阈值也呈现相似变化，即在 4~10 km² 尺度跨幅下为 43 km，而在 4~70 km² 尺度跨幅下前移至 23 km，表明尺度跨幅扩大同样会放大地市级城市周边游憩与生境服务协同关系的脆弱性。在区县级城乡梯度上，游憩与生境服务由空间协同关系向空间权衡关系的转换，在不同尺度跨幅下对应的梯度距离阈值差异较小，但转换速率随尺度跨幅增大而明显加快。这表明，在区县级城乡梯度上，该类空间关系转换的发生位置相对稳定，尺度扩大强化了转换的剧烈程度。在区县级城乡梯度上，游憩与生境服务由空间权衡关系向空间协同关系的转换，其对应的梯度距离与转换速率在不同尺度跨幅下变化均较小，表明这类转换在区县级尺度上具有较高的空间稳定性，受尺度扩展的影响相对有限。

5 讨论

本研究揭示了武汉都市圈蓝绿空间游憩与生境服务沿不同行政等级城市城乡梯度的非线性分异特征。城乡梯度本质上是由高强度人为干扰向低强度干扰过渡的连续谱系。在此谱系上，游憩服务因高度依赖社会经济及交通可达性，在城市近郊区域响应快速且剧烈；而生境服务受制于稳定的自然基底，其显著变化的梯度距离阈值通常滞后于游憩服务。这一发现与国内外关于城乡梯度研究



9 多尺度游憩与生境服务空间权衡协同关系互转的城乡梯度分布
Multi-scale urban-rural gradient distribution of spatial trade-off and synergy relationship transitions between recreational services and habitat services

的普遍规律一致^[9, 12, 15]。如 Yang 等^[15] 在北京市的研究中发现，游憩服务较生境服务随城乡梯度表现出更剧烈的空间异质性。更重要的是，本研究首次在都市圈尺度上揭示了这种滞后效应的层级性放大规律，即相较于游憩服务，生境服务在中心城市级、地市级和区县级的梯度响应距离阈值滞后幅度依次增加（分别滞后 11.59%、21.48% 和 34.45%）。这直接反映了都市圈城镇化进程中资源配置的“中心地”特征。高行政等级城市（如武汉市）拥有更强的财政能力与规划技术，可能在游憩开发中兼顾了对生境的低干扰利用，从而增强了游憩与生境服务之间的协调性；而较低行政等级城市往往面临发展与保护的两难，游憩开发对生态本底的扰动更为剧烈。这一规律提示，在制定不同层级行政单元的蓝绿空间保护与游憩发展“总量”目标时，应基于城乡梯度位置与城市等级的差异，进行分类配置。

本研究发现，游憩与生境服务之间的“数量”与“空间”权衡协同关系在不同行政等级城市的城乡梯度上存在显著分异：在区县级城市外围梯度上，游憩与生境服务之间的数量与空间权衡协同关系呈现出一致性，这可能是由于区县级城市外围人工干扰弱且空间异质性低，二者均主要依赖于自然生态

系统本底供给，在空间上呈现相似的分布特征，导致数量统计关系能够直接映射空间配置状态；而特大城市近郊则出现“数量协同但空间权衡”的现象，其原因可能在于大城市近郊通过建设郊野公园、绿道等措施在统计层面同步提升了游憩服务供给与生境覆盖面积，形成数量上的协同表象，但游憩设施的布局往往伴随硬化地面、人工设施占用等，直接切割了自然生境的连续性与完整性，导致在空间配置上二者呈现用地竞争与功能冲突。对于“高游憩-低生境”或“低游憩-高生境”权衡型的集聚区，应作为国土空间规划格局优化中优先进行空间功能分离的区域，通过划定生态保护红线、游憩发展边界等功能性分区，在空间上分离高强度游憩与核心生境区域，规避大规模、不可逆的功能冲突。

本研究证实，游憩与生境服务之间的空间权衡协同关系具有明显的尺度依赖性。30~50 km² 尺度被识别为游憩与生境服务间空间权衡协同关系最为稳定的尺度，这可能是由于该尺度既能完整捕捉游憩设施的客源辐射范围，又能涵盖生境斑块维持种群存续的最小面积阈值与生态过程完整性。同时，这一尺度大致对应武汉都市圈内多数乡镇（街道）的行政管辖面积，反映了乡镇级规划是落实蓝绿空间游憩与生境服务精细化功能布

局、促进局地协同的关键操作层级。此外，50~60 km² 的尺度转换是游憩与生境服务由空间协同关系向空间权衡关系转换概率最大的尺度，这可能是因为该尺度高频人类活动区与自然保护区的空间叠置概率陡增，导致空间冲突信号被放大。因此，该尺度的空间规划需注意规避系统性权衡风险。值得注意的是，尽管这些关键尺度的具体数值源于武汉都市圈实证，但其揭示的“存在一个能够稳定捕捉空间格局的观测尺度”以及“尺度扩大会增加协同向权衡转换的比例”这一尺度效应，对同类都市圈具有普适性的理论启示。

本研究发现，游憩与生境服务间权衡协同关系的城乡梯度差异与空间尺度效应并非独立存在，而是表现出明显的交互特征。随空间尺度的增大，权衡协同关系的梯度响应和关系逆转距离阈值均向城市中心方向前移，表明靠近城市中心的区域空间权衡协同关系更不稳定。同时，空间尺度对权衡协同关系的城乡梯度响应规律的调制作用在较低行政等级城市中更为明显。这意味着在地市级和区县级城市规划中，对于协调游憩利用与生态保护的空间尺度的选择更需审慎。而在武汉主城区等生境面积已被普遍固化的区域^[40]，规划重点应在于存量空间的生态品质提升与游憩公平性改善。这些发现为在何种管理层级、何处空间位置上协调游憩利用与生态保护决策提供了参考。

本研究基于静态截面数据，刻画了蓝绿空间游憩与生境服务间权衡协同关系的“梯度-尺度”响应规律。然而，都市圈是一个快速演变的动态系统，服务间权衡协同关系可能随城镇化进程、生态修复工程及政策调控等而发生动态变化。未来研究可纳入时间序列数据，系统揭示游憩与生境服务间权衡协同关系的时空演变轨迹，从而增强对该关系动态变化过程的理解^[41]。同时，本研究侧重于空间现象的揭示，对其背后深层次的社会经济驱动机制（如土地政策、投资偏好、公众参与等）的探讨尚不充分。未来可结合面板数据与质性研究方法，深入剖析“梯度-尺度”交互效应形成的人文社会动因，从而为制定更具针对性的干预政策提供依据。值得注意

的是，本研究基于 MaxEnt 模型对游憩服务进行量化，其样本点集中于高价值游憩资源，这可能导致对偏远自然区域游憩潜力的系统性高估，而低估城市内部高频使用的小型社区绿地的游憩价值。这种偏差可能在一定程度上导致在生境质量较高的远郊区域，游憩与生境服务的统计相关性被强化。未来研究可融合社交媒体数据、手机信令等多源大数据，更直接地刻画游憩实际使用强度^[42-43]，从而验证和深化本研究的发现。

6 结论

本研究以武汉都市圈为典型案例区，系统揭示了蓝绿空间游憩与生境服务间权衡协同关系对城乡梯度和空间尺度的复杂响应规律。本研究发现，蓝绿空间游憩与生境服务沿城乡梯度呈现非线性分异特征，生境服务相较于游憩服务普遍存在梯度滞后效应，且该效应随城市行政等级降低而明显增大。同时，游憩与生境服务之间的空间权衡协同关系表现出强烈的尺度依赖性，且 30~50 km² 是这一关系最为稳定的尺度，而 50~60 km² 是游憩与生境服务由空间协同关系大量向空间权衡关系转换的关键尺度。此外，空间权衡协同关系及其转换对城乡梯度的响应阈值受空间尺度和城市行政等级共同调控。例如，随着空间尺度扩大，“高游憩-高生境”协同型面积占比由降转升的梯度阈值整体向城市中心方向前移，且这种尺度调制现象在较低行政等级城市梯度上表现得更为明显。这些研究发现深化了对都市圈蓝绿空间多功能冲突与协调关系的理解，为武汉都市圈及其他同类都市圈实现生态保护与游憩开发的动态平衡提供了可操作的空间治理路径参考。

参考文献 (References):

- [1] 何丹, 金凤君, 周璟. 基于 Logistic-CA-Markov 的土地利用景观格局变化: 以京津冀都市圈为例[J]. 地理科学, 2011, 31 (8): 903-910.
- [2] HE D, JIN F J, ZHOU J. The Changes of Land Use and Landscape Pattern Based on Logistic-CA-Markov Model: A Case Study of Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(8): 903-910.
- [3] 方创琳. 新发展格局下的中国城市群与都市圈建设[J]. 经济地理, 2021, 41 (4): 1-7.
- [4] FANG C L. China's Urban Agglomeration and Metropolitan

- Area Construction Under the New Development Pattern[J]. Economic Geography, 2021, 41(4): 1-7.
- [3] KONG F H, YIN H W, NAKAGOSHI N, et al. Urban Green Space Network Development for Biodiversity Conservation: Identification Based on Graph Theory and Gravity Modeling[J]. Landscape and Urban Planning, 2010, 95(1/2): 16-27.
- [4] 江伟康, 吴隽宇. 基于地区GDP和人口空间分布的粤港澳大湾区生境质量时空演变研究[J]. 生态学报, 2021, 41 (5): 1747-1757.
- JIANG W K, WU J Y. Spatio-Temporal Evolution of Habitat Quality in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Based on Regional GDP and Population Spatial Distribution[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5): 1747-1757.
- [5] 宋子亮, 刘宇航, 黄子秋, 等. 城市绿地游憩服务网络特征及不同出行模式的响应差异[J]. 风景园林, 2024, 31 (2): 56-63.
- SONG Z L, LIU Y H, HUANG Z Q, et al. Characteristics of Urban Green Space Recreation Services Networks and Response Disparities Across Different Travel Modes[J]. Landscape Architecture, 2024, 31(2): 56-63.
- [6] LEPCZYK C A, ARONSON M F J, EVANS K L, et al. Biodiversity in the City: Fundamental Questions for Understanding the Ecology of Urban Green Spaces for Biodiversity Conservation[J]. BioScience, 2017, 67(9): 799-807.
- [7] 骆天庆, 傅玮芸, 夏良驹. 基于分层需求的社区公园游憩服务构建: 上海实例研究[J]. 中国园林, 2017, 33 (2): 113-117.
- LUO T Q, FU W Y, XIA L J. How to Provide Recreational Services in Local Parks: A Case Study in Shanghai, China[J]. Chinese Landscape Architecture, 2017, 33(2): 113-117.
- [8] 罗静茹, 张德顺, 刘鸣, 等. 城市生态系统服务的量化评估与制图以德国盖尔森基辛市沙克尔协会地区为例[J]. 风景园林, 2016, 23 (5): 41-49.
- LUO J R, ZHANG D S, LIU M, et al. Quantitative Assessment and Mapping of Urban Ecosystem Services the Case of Gelsenkirchen, Germany[J]. Landscape Architecture, 2016, 23(5): 41-49.
- [9] BARÓ F, PALOMO I, ZULIAN G, et al. Mapping Ecosystem Service Capacity, Flow and Demand for Landscape and Urban Planning: A Case Study in the Barcelona Metropolitan Region[J]. Land Use Policy, 2016, 57: 405-417.
- [10] GOBSTER P H. Visions of Nature: Conflict and Compatibility in Urban Park Restoration[J]. Landscape and Urban Planning, 2001, 56(1/2): 35-51.
- [11] HERRERO-JÁUREGUI C, ARNAIZ-SCHMITZ C, HERRERA L, et al. Aligning Landscape Structure with Ecosystem Services Along an Urban-Rural Gradient. Trade-Offs and Transitions Towards Cultural Services[J]. Landscape Ecology, 2019, 34(7): 1525-1545.
- [12] 蔡振饶, 方朝阳, 何清华, 等. 基于景观聚类的南昌市主城区城乡梯度识别及其生态系统服务响应[J]. 环境科学研究, 2022, 35 (3): 806-817.
- CAI Z R, FANG C Y, HE Q H, et al. Urban-Rural Gradient Identification and Ecosystem Service Response in Main Urban Area of Nanchang Based on Landscape Clustering[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(3): 806-817.
- [13] GUAN Q C, CHEN L, WANG Q R, et al. Dynamical Identification of Urban-Rural Gradient and Ecosystem Service Response: A Case Study of Jinghong City, China[J].

Land, 2024, 13(3): 306.

[14] SHI Q Q, CHEN H, LIANG X Y, et al. Combination of Participatory Mapping and Maxent Model to Visualize the Cultural Ecosystem Services at County Scale[J]. Ecosystem Services, 2025, 72: 101710.

[15] YANG Y Y, YANG M Y, WANG W Y, et al. Spatial Heterogeneity and Driving Factors of Ecosystem Service Trade-Offs in Beijing's Ecological Conservation Area: Insights for Spatial Planning and Management[J]. Landscape Ecology, 2025, 41(2): 19.

[16] 陈俊辰, 贺淑钰, 薛晶, 等. 多尺度生态系统服务的权衡关系及其对景观配置的响应: 以湖北省为例[J]. 生态学报, 2023, 43 (12): 4835-4846.

CHEN J C, HE S Y, XUE J, et al. Exploring Ecosystem Service Trade-Offs and Their Response to Landscape Configuration at Multi-Scales: A Case Study of Hubei Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(12): 4835-4846.

[17] CUI L H, ZHENG S, JIN Y F, et al. Understanding the Nonlinear Trade-Off Relationship to Optimize Urban-Rural Ecosystem Services: A Case Study in Arid and Semi-Arid Region, China[J]. Habitat International, 2025, 166: 103567.

[18] LI Y, GENG H C, LUO G J, et al. Multiscale Characteristics of Ecosystem Service Value Trade-Offs/Synergies and Their Response to Landscape Pattern Evolution in a Typical Karst Basin in Southern China[J]. Ecological Informatics, 2024, 81: 102584.

[19] ZENG S P, JIANG C Q, BAI Y F, et al. Understanding Scale Effects and Differentiation Mechanisms of Ecosystem Services Tradeoffs and Synergies Relationship: A Case Study of the Lishui River Basin, China[J]. Ecological Indicators, 2024, 167: 112648.

[20] 刘小波, 王玉宽, 刘勤, 等. 基于城市化梯度的中国西南地区生态系统服务权衡与协同[J]. 生态学报, 2023, 43 (22): 9416-9429.

LIU X B, WANG Y K, LIU Q, et al. Tradeoffs-Synergies Analysis of Ecosystem Services Along Urbanization Gradient in Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22): 9416-9429.

[21] ZHANG J Y, ZHANG Z Y, LIU L, et al. Scaling Effects of Ecosystem Service Trade-Off and Synergy in Arid Inland River Basins: A Case Study of the Manas River Basin of Xinjiang, China[J]. Ecological Indicators, 2025, 173: 113358.

[22] 邵明, 李方正. 城市生态空间生态系统服务功能权衡协同及管控研究: 以成都东部新城为例[J]. 风景园林, 2021, 28 (7): 114-120.

SHAO M, LI F Z. Research on Trade-off and Synergistic Relationship of Ecosystem Service and Space Regulation in City Ecological Space: A Case Study of Chengdu Eastern New City[J]. Landscape Architecture, 2021, 28(7): 114-120.

[23] 黄金川, 林洁曦, 漆潇潇. 面向国土空间优化的三生空间研究进展[J]. 地理科学进展, 2017, 36 (3): 378-391.

HUANG J C, LIN H X, QI X X. A Literature Review on Optimization of Spatial Development Pattern Based on Ecological-Production-Living Space[J]. Progress in Geography, 2017, 36(3): 378-391.

[24] 彭勇, 肖玲. 武汉都市圈结构特征与结构优化研究[J]. 城市问题, 2007 (1): 31-35.

PENG Y, XIAO L. A Study on Structural Characters and Optimization of the Structure of Wuhan Metropolitan Areas[J]. Urban Problems, 2007(1): 31-35.

[25] SONG Z L, LIU W P. Changes in the Attraction Area and Network Structure of Recreation Flows in Urban Green, Blue

and Grey Spaces Under the Impact of the COVID-19 Pandemic[J]. Cities, 2024, 146: 104744.

[26] 刘文平, 袁雄钢, 陈伟鹏. 城市综合公园游憩服务多时空粒度辐射特征研究: 以武汉为例[J]. 中国园林, 2019, 35 (1): 29-34.

LIU W P, YUAN X G, CHEN W J. Multi-spatiotemporal Decay of Recreational Services of Urban Comprehensive Parks in Wuhan[J]. Chinese Landscape Architecture, 2019, 35(1): 29-34.

[27] 吴岩, 贺旭生, 杨玲. 国土空间规划体系背景下市县蓝绿空间系统专项规划的编制构想[J]. 风景园林, 2020, 27 (1): 30-34.

WU Y, HE X S, YANG L. Compilation Conception of City and County Level Blue-Green Space System Specialized Planning Under National Territory Spatial Planning System[J]. Landscape Architecture, 2020, 27(1): 30-34.

[28] 许浩, 金婷, 刘伟. 苏锡常都市圈蓝绿空间规模与格局演变特征[J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2022, 46 (1): 219-226.

XU H, JIN T, LIU W. Study on the Scale and Landscape Pattern Evolution Characteristics of Blue-Green Space in Suzhou-Wuxi-Changzhou Metropolitan Area, China[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2022, 46(1): 219-226.

[29] 向炆, 周志翔. 蓝绿空间景观格局对城市热岛的影响[J]. 中国园林, 2023, 39 (1): 105-110.

XIANG Y, ZHOU Z X. Influence of Blue-Green Spatial Landscape Pattern on Urban Heat Island[J]. Chinese Landscape Architecture, 2023, 39(1): 105-110.

[30] 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.

[31] 陈实, 陈帅朋, 张梦媛, 等. 基于主导功能与管控约束的都市圈退化生态空间修复与游憩利用协同潜力评估[J]. 华中农业大学学报, 2026, 45 (1): 155-166.

CHEN S, CHEN S P, ZHANG M Y, et al. Dominant Functions and Control Constraints-Based Assessment of Synergistic Potential of Ecological Space Restoration and Recreational Utilization in Degraded Metropolitan Areas[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2026, 45(1): 155-166.

[32] SHANG N, CAO K J. Spatial Assessment of Tourists' Demand for Cultural Ecosystem Services in the Kalajun World Natural Heritage Site, China[J]. Journal of Outdoor Recreation and Tourism, 2025, 52: 100972.

[33] 钱敏, 张虹, 潘明辰, 等. 成渝城市群生态系统调节服务与不同文化服务的权衡协同及驱动机制[J/OL]. 环境科学, 1-18[2026-01-05]. <https://doi.org/10.13227/j.hj.kx.202506009>.

QIAN M, CHANG H, PAN M C, et al. Trade-offs/Synergies and Driving Mechanism Between Ecosystem Regulation Services and Various Ecosystem Cultural Services in Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration[J/OL]. Environmental Science, 1-18[2026-01-05]. <https://doi.org/10.13227/j.hj.kx.202506009>.

[34] GHASEMI M, CHARRAHY Z, GONZÁLEZ-GARCÍA A. Mapping Cultural Ecosystem Services Provision: An Integrated Model of Recreation and Ecotourism Opportunities[J]. Land Use Policy, 2023, 131: 106732.

[35] YANG L J, CAO K J. Spatial Matching and Correlation Between Recreation Service Supply and Demand in the Ili River Valley, China[J]. Applied Geography, 2022, 148: 102805.

[36] BING Z H, QIU Y S, HUANG H P, et al. Spatial Distribution of Cultural Ecosystem Services Demand and Supply in Urban and Suburban Areas: A Case Study from Shanghai, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 127: 107720.

[37] LV H, WU Z N, GUAN X J, et al. Threshold Effect of Data Amount and Grid Size on Urban Land Use Type Identification Using Multi-source Data Fusion[J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 98: 104855.

[38] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, DUDÍK M, et al. Opening the Black Box: An Open-Source Release of Maxent[J]. Ecography, 2017, 40(7): 887-893.

[39] 陈泓宇, 李雄. 基于MSPA-InVEST模型的北京中心城区绿色空间生境网络优化[J]. 风景园林, 2021, 28 (2): 16-21. CHEN H Y, LI X. Optimization of Green Space Habitat Network of Central Beijing Based on MSPA-InVEST Model[J]. Landscape Architecture, 2021, 28(2): 16-21.

[40] 孙苗苗, 吕江涛, 李晓文, 等. 蓝绿基础设施生态系统服务城乡差异与尺度效应[J]. 应用生态学报, 2024, 35 (12): 3295-3303.

SUN M M, LYU J T, LI X W, et al. Urban-Rural Difference and Scale Effect of Ecosystem Services of Blue-Green Infrastructure[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(12): 3295-3303.

[41] REN Q R, LIU D D, LIU Y F, et al. Spatio-Temporal Dynamics and Socio-Ecological Determinants of Ecosystem Service Interplays in Shandong Province's Coastal Region (2000-2020): Implications for Environmental Protection and Sustainable Ecosystem Management[J]. Environmental Research, 2024, 243: 117824.

[42] 路露, 吴隽宇, 代色平, 等. 多源大数据驱动的生态系统文化服务研究进展[J]. 风景园林, 2026, 33 (1): 100-108. LU L, WU J Y, DAI S P, et al. Research Progress on Cultural Ecosystem Service Driven by Multi-source Big Data[J]. Landscape Architecture, 2026, 33(1): 100-108.

[43] RASTANDEH A, BORGSTRÖM S, PICKERING C M, et al. Priorities for Peri-urban Recreation Ecology Research, Policy, and Practice in a Transforming World[J]. Landscape Ecology, 2025, 40(12): 230.

图表来源(Sources of Figures and Table):

文中图表均由作者绘制。

(编辑 / 刘昱霏)

作者简介:

陈实 / 男 / 华中农业大学园艺林学学院在读硕士研究生 / 研究方向为景观服务与地景规划

何明婵 / 女 / 硕士 / 安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司工程师 / 研究方向为乡村规划设计

陈帅朋 / 男 / 华中农业大学园艺林学学院在读博士研究生 / 研究方向为景观服务与地景规划

俞培孟 / 男 / 硕士 / 中冶南方工程技术有限公司工程师 / 研究方向为景观服务与地景规划

刘文平 / 男 / 博士 / 华中农业大学园艺林学学院教授、博士研究生导师 / 研究方向为景观服务与地景规划
通信作者邮箱: liuwenping@mail.hzau.edu.cn

CHEN S, HE M C, CHEN S P, YU P M, LIU W P. Urban-Rural Gradient Responses and Scale Effects of Trade-Offs and Synergies Between Recreation and Habitat Services of Blue-Green Spaces in the Wuhan Metropolitan Area[J]. Landscape Architecture, 2026, 33(5): 33-42. DOI: 10.3724/j.fjyl.LA20260069.

Urban-Rural Gradient Responses and Scale Effects of Trade-Offs and Synergies Between Recreation and Habitat Services of Blue-Green Spaces in the Wuhan Metropolitan Area

CHEN Shi, HE Mingchan, CHEN Shuaipeng, YU Peimeng, LIU Wenping*

Abstract:

[Objective] A systematic understanding of how the urban-rural gradient and spatial scale modulate the trade-offs and synergies between recreation and habitat services provided by blue-green spaces remains largely absent. This knowledge gap severely constrains the precise planning and adaptive management of blue-green spaces in rapidly urbanizing metropolitan regions. To address this shortcoming, this study integrates the dual perspectives of the urban-rural gradient and spatial scale, aiming to systematically reveal the spatial heterogeneity and scale dependence of the trade-offs and synergies between recreation and habitat services in metropolitan blue-green spaces.

[Methods] The Wuhan Metropolitan Region was selected as the case study. A comprehensive analytical framework, termed the “gradient-scale” framework, was developed to examine the relationship between recreation and habitat services. Three complementary modelling approaches were employed: 1) the maximum entropy (MaxEnt) model to map recreation service potential based on environmental and socio-economic predictors; 2) the integrated valuation of ecosystem services and trade-offs (InVEST) model to quantify habitat services; and 3) the generalised additive model (GAM) to flexibly capture non-linear responses and interaction effects between the two services across gradients and scales. Multi-scale analyses were conducted using a series of spatial units (from 4 km² to 70 km²) to detect how the direction and magnitude of the recreation-habitat relationship change with increasing grain size.

[Results] First, along the urban-rural gradients, the distance thresholds at which habitat services either decline or rebound systematically lagged behind those of recreation services. Specifically, at the central-city level, the lag distance was 7.58 km; at the prefectural-city level, 7.74 km; and at the county-city level, 2.89 km, respectively, corresponding to relative lag rates of 11.59%, 21.48%, and 34.45%. Second, the spatial trade-off and synergy relationship between recreation and habitat services showed strong scale dependence. The 30–50 km² interval was identified as a relatively stable scale range at which the spatial relationship was captured most clearly, whereas 50–60 km² emerged as the critical scale at which the dominant spatial relationship shifted from spatial synergy to spatial trade-off. As analytical scale increased, local spatial heterogeneity was progressively smoothed, and the area proportion of “high-high” synergy zones was especially sensitive to scale enlargement. Third, the response thresholds of spatial trade-off and synergy types and their transitions to urban-rural gradients were jointly regulated by spatial scale and urban hierarchy. With increasing spatial scale, the gradient thresholds associated with type transitions and relationship reversals generally moved toward urban centers, indicating that the spatial trade-off and synergy relationship is less stable in areas closer to urban cores. Moreover, the modulating effect of spatial scale on gradient response patterns was more pronounced in lower-tier cities, particularly in prefectural-level and county-level city systems.

[Conclusion] By integrating the dual lenses of urban-rural gradients and spatial scales, this study provides a novel, empirically grounded understanding of how recreation and habitat services of blue-green spaces interact in a complex metropolitan setting. The proposed framework contributes to achieving a

dynamic equilibrium between recreational use and ecological protection, thereby promoting regional sustainability in rapidly urbanizing metropolitan regions.

Keywords: metropolitan area; blue-green space; recreational services; habitat services; trade-off and synergy relationships; urban-rural gradient; scale effect

Authors:

CHEN Shi is a Master student in the College of Horticulture & Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University. His research focuses on landscape services and landscape planning.

HE Mingchan, Master, is an engineer of Anhui Transport Consulting & Design Institute Co., Ltd. Her research focuses on rural planning and design.

CHEN Shuaipeng is a Ph.D. candidate in the College of Horticulture & Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University. His research focuses on landscape services and landscape planning.

YU Peimeng, Master, is an engineer of WISDRI Engineering & Research Incorporation Limited. His research focuses on landscape services and landscape planning.

LIU Wenping, Ph.D., is a professor and doctoral supervisor in the College of Horticulture & Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University. His research focuses on landscape services and landscape planning.

Corresponding author Email: liuwenping@mail.hzau.edu.cn