

成都市主城区绿色基础设施遥感解译及其生态服务现状研究

Research on Remote Sensing Interpretation and Ecological Service Status of Green Infrastructure in the Main Urban Area of Chengdu

茉洁 钱丽源 朱庆涛 周斯翔*

Mojdeh AMINI PISHRO QIAN Liyuan ZHU Qingtao ZHOU Sixiang*

(西南交通大学建筑学院, 成都 611756)

(School of Architecture, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan, China, 611756)

文章编号: 1000-0283(2025)01-0044-08

DOI: 10.12193/j.laing.2025.01.0044.005

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2024-05-24

修回日期: 2024-09-01

摘要

城市绿色基础设施 (Urban Green Infrastructure, UGI) 的广泛应用, 正在持续重塑全球城市景观, 对城市生态系统服务产生重要影响。成都作为紧邻川西高原的内陆盆地城市, 其城市景观在 UGI 构成的多样性等方面与中国其他城市具有显著差异。以成都城市景观为中心展开综合调查, 使用地理信息系统、生态服务建模和空间分析来量化 UGI 对生态服务的影响, 并采用系统化方法将 UGI 整合到优化城市生态系统服务的规划建议中, 为快速城市化中的成都主城区 UGI 空间布局优化, 特别是空间聚集程度冷点区域改善, 提供具体的解决策略。总结出三个关键趋势: (1) 成都市的土地利用发生了重大变化, 以城市区域绿色空间的显著缩小和建设用地的显著扩大为特征, 主要归因于人口增长和土地利用模式的变化; (2) 空间聚集程度热点和冷点的调查分析显示, 主城区大多数温度冷点位于成都的东部, 而基于其价值的热点最高集中度位于南部地区; (3) 对 UGI 内碳密度的分析显示, 生态系统服务集中度的峰值出现在城市中心区域。

关键词

城市绿色基础设施; 生态系统服务; 成都主城区; 遥感解译; 碳效应; 生态网络; 生物多样性; 城市规划; 环境可持续性

Abstract

The widespread application of Urban Green Infrastructure (UGI) continuously reshapes the global urban landscape and significantly impacts urban ecosystem services. As an inland basin city adjacent to the western Sichuan Plateau, Chengdu's urban landscape differs considerably from that of other cities in China in terms of the diversity of UGI composition. This article conducts a comprehensive investigation centered on the urban landscape of Chengdu, utilizing geographic information systems, ecological service modeling, and spatial analysis to quantify the profound impact of UGI on ecological services. A systematic approach is adopted to integrate UGI into planning recommendations for optimizing urban ecosystem services, providing specific solutions for optimizing the spatial layout of UGI in the main urban area of Chengdu during rapid urbanization, especially for improving biodiversity hotspots. The study summarized three key trends: (1) Significant changes in land use in Chengdu, characterized by a significant reduction in green space in urban areas and a significant expansion of construction land, have been mainly attributed to population growth and changes in land use patterns. (2) The investigation and analysis of spatial clustering hotspots and cold spots reveal that most of the temperature cold spots in the main urban area are in the eastern part of Chengdu, while the highest concentration of hotspots based on their value is in the southern region. (3) The analysis of carbon density within UGI indicates that the peak of ecosystem service concentration occurs in the central urban areas.

Keywords

urban green infrastructure; ecosystem services; main urban area of Chengdu; remote sensing interpretation; carbon effect; ecological network; biodiversity; urban planning; environmental sustainability

Mojdeh AMINI PISHRO (茉洁)

1995年生/女/伊朗克尔曼人/在读硕士研究生/研究方向为城市绿色基础设施对生态系统服务的影响评价

钱丽源

1988年生/女/江苏太仓人/博士/副教授/研究方向为生态系统监测、国家公园自然保护地管控

周斯翔

1979年生/男/浙江杭州人/硕士/讲师/研究方向为可持续人居环境、景观遗产与园林文化

*通信作者 (Author for correspondence)

E-mail: zhousixiang@swjtu.edu.cn

基金项目:

国家自然科学基金青年项目“川藏铁路(川西段)沿线自然保护区过渡区生态安全格局构建研究”(编号: 51908470)

全球城市化进程的加速带来了一系列挑战,包括绿地减少和生态系统退化,这要求城市规划采用创新型策略^[1-2]。自20世纪末以来,城市绿色基础设施(Urban Green Infrastructure, UGI)作为支撑人类社会与自然的“绿色生命支持系统”^[3],对增强城市生态系统服务(Ecosystem Service, ES)起到的作用日益被重视。UGI支持生态网络及其过程,增强城市生态系统的整体健康,可以改善城市居民的身心健康、心理健康和社会凝聚力,促进生物多样性保护,改善空气及水质,提升城市居民的文化和休闲生活品质^[4-5]。同时UGI也带来了挑战和潜在的负面影响:其功能实现需要持续的维护和管理,这将耗费大量资源;增强的绿色空间可能会导致房产价值上升,潜在地使低收入居民搬迁,这一现象被称为绿色绅士化;UGI的建设还有可能引入入侵物种或创造吸引害虫的栖息地。有研究探讨了UGI和ES之间的关系,强调需要一个坚实的概念框架和有效的工具来管理城市社会——生态系统^[6]。UGI通过提供碳储存、食物生产、削弱噪音等服务来支持ES的功能实现,这些服务显著增强了城市的活力和可持续性。尽管在人口密集区整合UGI面临挑战,但城市基础设施绿色化的迫切性是显而易见的,在发展与环境保护间需要平衡、可持续的城市规划^[7-9]。随着全球城市化趋势的持续,将UGI纳入城市规划对于实现可持续发展至关重要,它能够提供从缓解城市热岛效应到促进经济发展的多重生态福利^[9],城市规划者和政策制定者优先考虑UGI建设的必要性正日益突显^[10]。

1 研究区概况

成都是中国西部人口最多的城市之一,城市总面积约14 335 km²,常住人口约2 140万人。本研究选取成都市中心城区为研究对象,

其占地面积约420 km²,总人口约600万。成都属湿润亚热带季风气候,四季分明,年平均气温在16~18℃,年平均降雨量约1 000 mm,主要集中在夏季。虽然城市建成区扩张迅速,但成都仍保留大量的绿色空间,包括公园、城市森林和周边的农业用地。土地利用模式呈现住宅、商业、工业和绿色空间混合的特征,这对于ES各种服务的提供至关重要。成都的UGI主要包括公园、绿带、城市森林、绿色屋顶和湿地等多种元素。这些绿色空间在提供休闲区域、改善空气质量、缓解城市热岛效应和碳固存等方面起着重要作用,提升了城市的宜居性。

成都的UGI建设生动展示了在快速城市化发展进程中,UGI与ES之间的动态关系,集中反映全球城市区域普遍面临的挑战,包括环境退化、UGI减少以及ES需求增加,特别是由于交通密集和工业活动引起的严重空气污染问题。1978–2002年,成都城市扩张超过350%,周边绿地转变为城市建设用地,这种急剧变化导致栖息地破坏和生物多样性下降。过去30年中,土地使用显著地从农业转向城市建设。2015–2019年,城市发展方向从西北逐渐向东南移动,此举有助于保护重要的森林和湿地免受城市化的影响。2017–2020年,成都的人类足迹从9.28%增加到10.12%,人类活动影响的持续增长,迫切需要提升UGI建设水平,以缓解城市扩张的负面影响(如污染、ES损失)。UGI存在调节气候、支持生物多样性和改善生活质量等益处^[11-12]。有研究指出,人均32 m²的绿色空间是缓解负面影响、确保可持续城市发展的关键^[13]。

2 研究方法

2.1 数据收集

UGI设计规模和区域是对ES具有贡献作

用的两个主要因素^[14]。本研究探讨成都市2017年、2023年UGI和ES的时空动态。基础遥感数据选用的卫星8号TM(Landsat Collection 2 Level-1)图像(2–5月),因其时间接近性确保了分析的可靠性。同时划定研究区域并收集各种数据来源,包括生物量碳密度数据和社会经济指标。生物量碳密度数据来自美国国家航空航天局生物地球化学动态分布主动档案中心2010年的数据集,该数据集提供了关于地上和地下生物量碳密度的详细信息。社会经济指标数据来自中国国家统计局、成都市统计局,包括人口、收入水平、土地利用模式和经济活动。使用波段2、3、4、5、6、7进行图像合成和分类,进而寻找有效UGI。选定的半近红外波段用于观测13个光谱波段中的特定方面,包括2、3和5波段,波长范围从42 m到90 m不等。这些波段提供了详细的图像。例如,1到7波段的空间分辨率为30 m,覆盖了不同的色彩范围,如蓝色、绿色、红色和近红外。此外,Landsat和Sentinel卫星在4个光谱波段捕捉辐射信息,如绿色、红色和近红外,空间分辨率为30 m。

2.2 ES与服务受益区相关性模型构建

本研究借助自然资本项目(The Natural Capital Project)开发的InVEST软件,版本3.8.7^[15],在建模时进行适当修改。该套评估和可视化ES模型分布,利用空间和环境变量,使其特别适合于检查各级别的ES效能^[11]。联合国生态系统服务评估提出将ES分为支持服务、供给服务、调节服务和文化服务4大类。在城市环境中,通过更详细的研究将这些子类进行更细微和具体的分类。根据自然区域的可达性和吸引力估测访问这些区域的次数来评估自然区域的休闲和旅游价值。其中城市温度控制模型构建(Urban Temperature Control, UTC)展

区域 模块	居住区 Living neighborhoods	购物和娱乐区 Shopping and entertainment zones	文化和休闲场所 Cultural and recreational spots	学习机构 Learning institutions	医疗设施 Medical facilities	交通中心 Transportation centers	政府设施 Government facilities
UTC	■		■		■	■	
UFC	■						■
USC			■	■			■
UAC	■		■				■
UMC		■	■		■		

图1 成都市主城区ES与服务受益区的空间关系模型
Fig. 1 The spatial relationship model of ES and SBA in the main urban area of Chengdu

示了城市绿地的降温能力，能够抵消城市热岛效应的不利影响。UGI的降温潜力与其规模密切相关，较大规模的UGI具有更明显的降温效果^[16-17]。ES评估显示，这一部分的效果占36%。城市洪水控制 (Urban Flood Control, UFC) 增强绿地的表面径流保留能力可以缓解洪水，从而降低人类安全风险并减少对城市基础设施的损害^[19]。使用诸如透水铺装、绿地和蓄水池等UGI措施，成都以有效吸收和管理过量的雨水为目标开展了积极的海绵城市建设。城市土壤控制 (Urban Soil Control, USC)，基于土地利用调整，流域沉积物流出量的显著变化，可以对土壤肥力、水资源质量、下游灌溉和水生生态系统的生物多样性产生显著影响^[19-20]。城市边缘地区的土地转变影

响农业生产服务，从而影响当地生计的维持^[21]。USC模型与土壤保持和侵蚀控制相关，有助于了解绿色基础设施在维持土壤健康和防止侵蚀方面的作用。城市美学控制 (Urban Aesthetic Control, UAC)，会被城市发展削弱城市绿地的景观和美学属性^[21]。在成都，经过战略性规划的UGI建设，包括传统茶园和河滨公园，增强了城市的文化和娱乐吸引力。相关研究数据显示，中国大约50%的城市展示了相对中等水平的生态效率^[22,23]，成都为其中之一。此外，城市美丽和青年健康占生态系统服务约23%^[24]。针对成都展开分析的InVEST模型重点关注UTC、UFC和USC (表1)，此类模型适用于评估基于成都环境特征UGI建设的生态系统服务效能。

首先准备空间数据集 (土地利用图、数字高程模型和气候数据)，在InVEST中选择相应模型。参数设置反映了当地的环境条件，并使用历史数据对模型进行校准。随后生成明确的空间地图，显示有效的温度调节、洪水缓解和土壤保持区域。通过独立的数据集进行验证，以确保结果的准确性，进而用于支持城市规划决策。

利用GIS分析，创建成都主城区ES与服务受益区的空间关系模型。图1使用白色和蓝色方块表示不同生态系统服务模块 (UTC、UFC、USC、UAC、UMC) 在不同城市区域 (如居住区、购物和娱乐区、文化和休闲场所等) 中的相关性。蓝色方块表明，相应的生态系统服务在特定城市区域中特别相关和适用，突出这些服务在该区域的影响力，强调其在城市空间战略性决策中的重要性。相反，白色方块则表明该生态系统服务在该特定区域中并不直接相关或适用性较低。例如，“居住区”下的UTC和UMC显示为蓝色方块，意味着这些服务在住宅区特别重要，而USC等服务可能在其他城市区域中更为相关。这种颜色编码的方法有效地可视化了不同城市环境中生态系统服务的优先级。

2.3 模型分析

通过GIS软件，利用遥感和图像进行连续变量分类。考虑植被生长、气候条件等变

表1 取自InVest生态系统服务的子领域信息
Tab. 1 Information on the subfields of ecosystem services taken from InVest

模型名称 Model name	功能描述 Function description	数据输入 Data inputs	输出 Outputs	精度/m Accuracy
城市温度控制 (Urban Temperature Control, UTC)	评估城市绿地的降温效益	土地利用 / 覆盖图、气温数据	温度变化图、降温效益	30
城市洪水控制 (Urban Flood Control, UFC)	评估城市绿地对洪水的缓解作用	土地利用 / 覆盖图、降水数据	洪水风险图、洪水缓解效益	30
城市土壤控制 (Urban Soil Control, USC)	评估城市绿地对土壤保持的作用	土地利用 / 覆盖图、土壤数据	土壤流失图、土壤保持效益	30

量, 基于过程的模拟模型, 预测在不同UGI情景下生态系统服务的变化。研究期间, 空间数据指导参数的选择以土地利用和土地覆盖作为参考层。模型参数化则基于最佳可用数据和当地文献。

2.3.1 热点分析和最近邻平均分析

热点检测的演变可追溯至点分布或特定空间域内点的空间组织的分析^[25-26]。收集研究区域的空间数据和属性值, 使用空间权重矩阵(例如邻接关系、基于距离)定义特征之间的空间关系, 使用Getis-Ord G_i^* 统计量识别显著的高值(热点)和低值(冷点)空间聚集, 计算见公式(1)。

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - X \sum_{j=1}^n w_{ij}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2}{n-1}}} \quad (1)$$

式中, G_i^* 是特征*i*的Getis-Ord G_i^* 统计量, x_j 是特征*j*的属性值, w_{ij} 是特征*i*和特征*j*之间的空间权重, X 是属性值的均值, S 是属性值的标准差, n 是特征的总数。 G_i^* 统计量是一个*z*值, 高的正*z*值表示显著的热点, 低的负*z*值表示显著的冷点。

收集研究区域的空间数据, 计算每个特征到其最近邻的距离。使用ANN公式计算平均最近邻比率, 并根据ANN比率和*z*值确定聚集或分散程度, 计算见公式(2)。

$$ANN = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i}{\frac{1}{2\sqrt{\frac{A}{n}}}} \quad (2)$$

式中, ANN是平均最近邻比率, d_i 是特征*i*到其最近邻的距离, n 是特征的总数, A 是研究区域的面积。ANN比率比较了观察到的平均距离与随机分布下的预期平均距离。

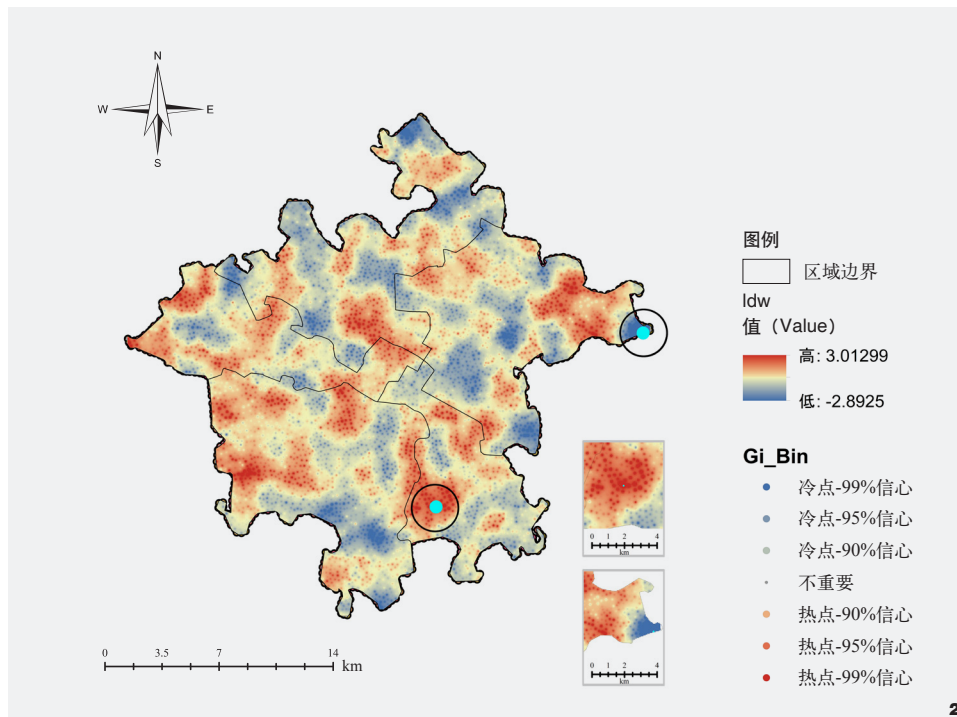


图2 2023年服务分布的热点和冷点的空间分布
Fig. 2 The spatial distribution of the hotspots and coldspots of service distribution in 2023

ANN比率小于1表示聚集, 而ANN比率大于1表示分散。

收集多年属性和密度数据后, 选择2023年进行分析。这种统计方法精细量化热点和冷点, 突出显示城市广阔地区服务提供高和低的显著集群。本研究使用最近邻平均分析来评估热点和冷点, 目标是*z*值低于0.05以达到平衡。

2.3.2 GIS数据模型分析

基于关键城市区域卫星图像进行的分析使用了Earth Explorer和ArcGIS(版本ArcMap 10.7, ESRI, 2023a)等工具。数据获取根据绿地、城市区域和水体比对照片进行分类, 以提高数据准确性。热点识别考虑UGI和ES指标的空间分析, 验证涉及实地调查和文献比较。利用ArcMap软件进行分析, 包括山体

阴影、地形地貌、坡度和方位等多项调查, 并详述获取与成都市UGI和ES相关的建模结果的方法。

3 结果分析

3.1 成都主城区热点分析和最近邻平均分析

在调查UGI建设基本情况和识别热点、冷点的基础上, 得出生态服务的空间分布状态。图2中以红色标示的冷点集中区域, 记录峰值为-2.89, 主要分布在成都东部, 其聚集程度明显超出了城市中心区。相比之下, 蓝色标示的热点聚集区, 峰值约为3.01, 被精确地定位在成都南部区域, 主要位于住宅区和主要通道之间^[27]。现场调研也充分证明了这一点(图3)。通过对收集数据的分析, 成都边缘地区和中心区域都存在缺乏重要的UGI设施的问题。值得注意的是, 在水体周围



图3 现场调查中热点和冷点最多的地点
Fig. 3 Sites with the highest number of hot/coldspots in field survey

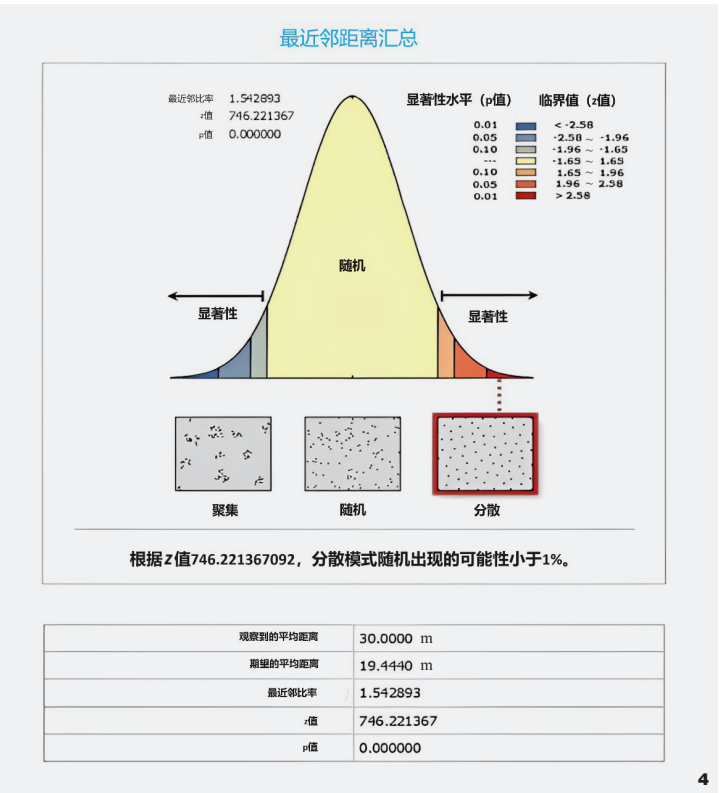


图4 ANN分析结果
Fig. 4 The analysis result of ANN

地区, UGI与住宅以及城市开放空间展现出良好的连通性。此外, 城市南部的ES数量显著优于城市北部, 因为南部地形更丰富, 极大地促进了可以作为UGI的对象数量及其多样性的增加。

GIS模型显示, 在ES范畴影响 p 值为0.003时, UGI分布最低点的 z 值为-2.91。相反, ES数值在高点时, 其 z 值达到了最高值3.25, 此时相应的 p 值为0.001。在该地区, 由于道路建设和城市建成区的扩展, UGI绝对数值快速减少, 这直接导致碳储存和ES服务能力的显著降低。值得注意的是, 2023年, UGI的数值出现显著的增量, 尽管其尚未达到2017年的水平, 但可以被认为是一个重要转折点^[28]。研究区域的ANN比率为

1.542893, z 值为746.221367, p 值为0.000000 (图4)。这表明UGI和ES在成都的分布呈现显著的分散模式。

3.2 土地利用空间分布

比较2017年、2020年、2023年三年的数据, 观察到土地覆盖和城市密度发生显著变化。2017年, 城市区域与绿色空间和一些水体呈现显著交错分布(图5)。2020年, 城市建成区密度增加, 绿色空间减少(图6)。到2023年, 这种趋势更加明显, 城市建成区域的密度明显增加, 绿色空间进一步减少, 表明城市建设用地的继续扩展和植被覆盖率的降低(图7)。核密度分析支持这一观察结果。2017年的核密度值显示某些城市区域的密度

相对较高, 峰值约为288 876。到2023年, 高密度城市区域的分布已经扩展, 表明这6年间城市增长和密度显著增加。

DEM地图显示, 研究区域最高海拔达到546 m, 最低约为425 m。阴影值描绘了地形阴影效果, 范围为0 ~ 254 m。坡度分析显示了地形陡峭度的变化, 范围为0 ~ 60.3013 m。查看DEM和阴影分析, 海拔或阴影值没有显著变化, 显示研究区域的地形特征在2017-2023年间基本保持一致。尽管海拔和坡度等地理特征保持不变, 但它们在城市发展方面, 特别是建设用地选择方面, 始终存在重要影响。

分析结果显示, 2017-2023年城市景观发生显著变化。城市建成区域的扩展, 导致绿

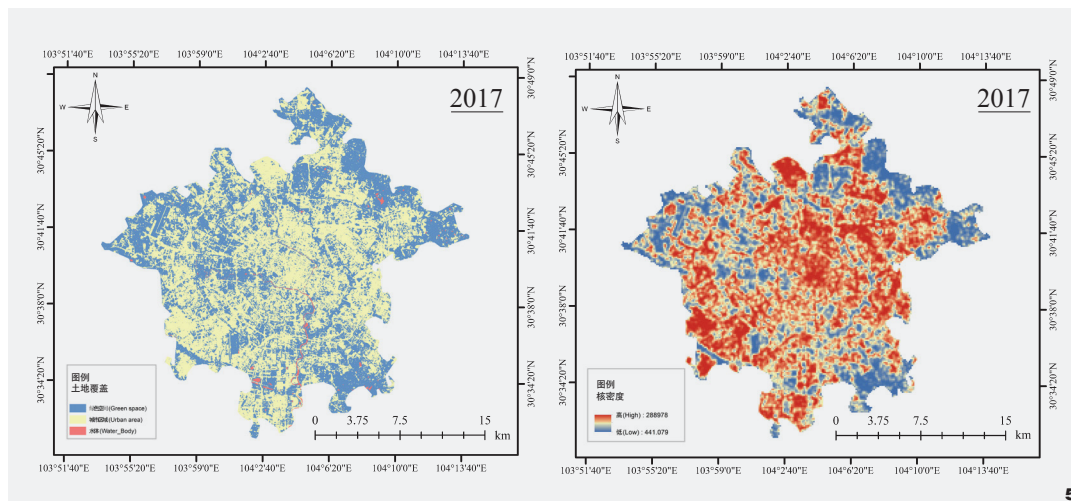
色空间减少。核密度值表明城市密度增加，反映了城市人口的不断增长和基础设施的持续建设。伴随快速的城市化进程，环境和可持续发展对UGI和ES建设水平的提升产生了更迫切的需求。

3.3 对当地社区和人口中心相应影响分析

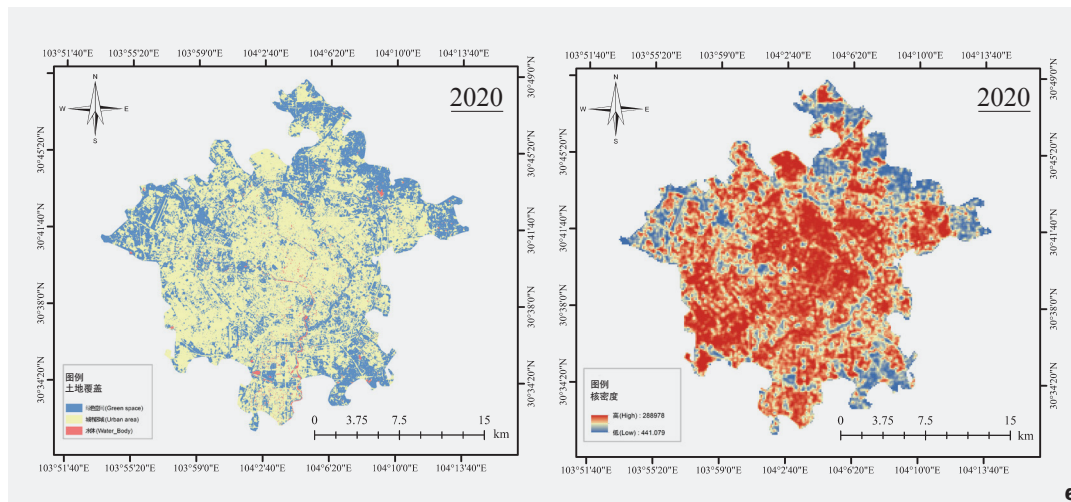
成都的UGI体系包括休闲森林(包括部分对公众开放的森林保护区)、各种大小的城市公园以及自然湿地。2017-2023年，绿地面积减少6.35 km²，这部分面积反过来又成为城市建设空间(表2)。针对这一现实，建议通过在较小规模的城市建成区内增加绿色覆盖，以实现“绿化建成的城市绿色基础设施”^[29]。

需要注意的是，成都丰富的降雨量和河流网络，对UGI的稳定性和环境效益产生了多方面的积极影响。这些水资源维持绿地自身平衡，对生态平衡贡献了动态作用。它们还是气候韧性的重要组成部分，有力减轻了极端天气事件对UGI的影响。充足的降雨和河流系统之间的相互作用增强了UGI适应气候变化的能力，并为城市的可持续发展打下坚实基础。2023年观察到现有水体面积较2017年有所减少，但其在维持城市生产生活中仍起着不可替代的作用。

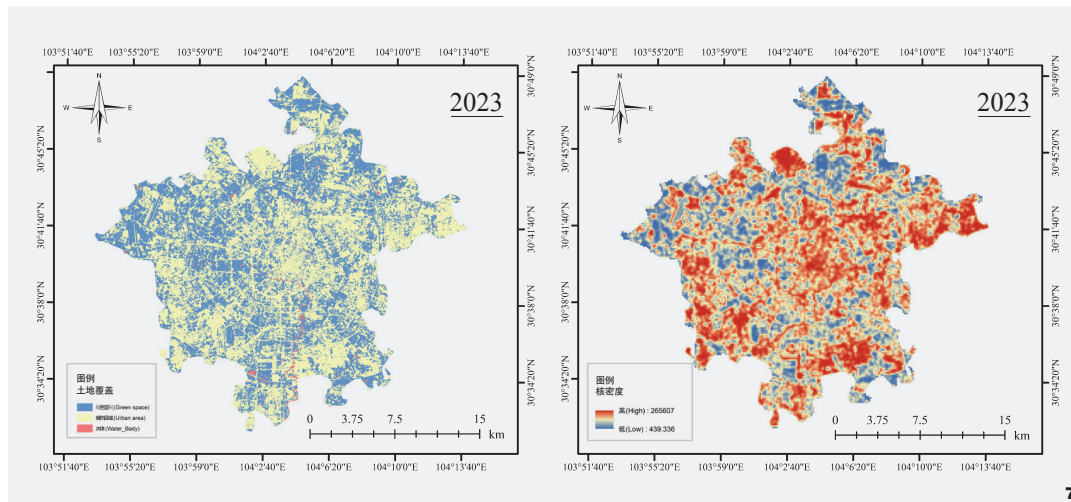
城市建成区域在同一时期的模型呈总体上升趋势，从2017年



5



6

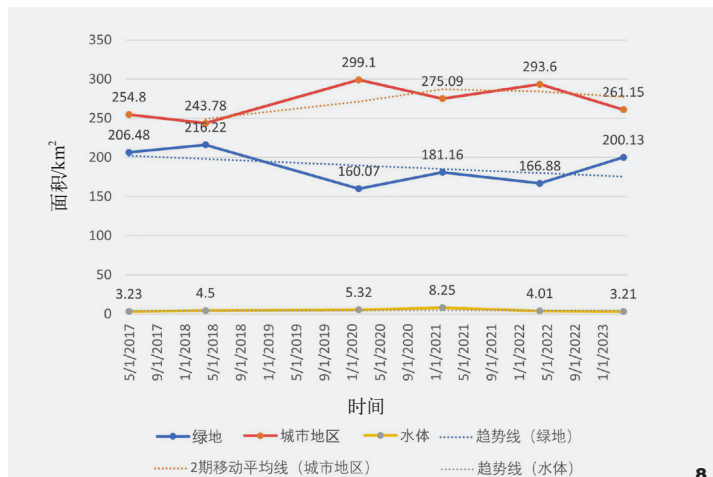


7

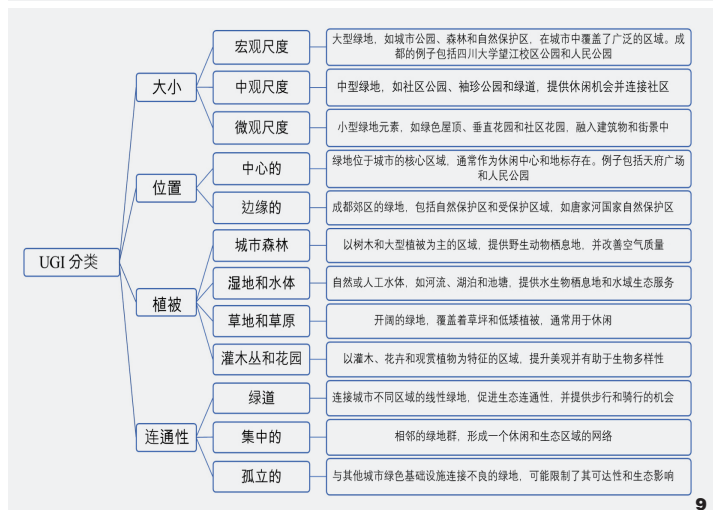
图5 2017年城市绿色基础设施的空间分布
Fig. 5 The spatial distribution of urban green infrastructures in 2017

图6 2020年城市绿色基础设施的空间分布
Fig. 6 The spatial distribution of urban green infrastructures in 2020

图7 2023年城市绿色基础设施的空间分布
Fig. 7 The spatial distribution of urban green infrastructures in 2023



8



9

图8 2017-2023年成都市主城区中不同空间变化
Fig. 8 Changes of different spaces from 2017 to 2023 in the main urban area of Chengdu

图9 基于规模、位置、植被类型和连通性的成都市UGI分类
Fig. 9 Classification of UGI in Chengdu based on size, location, vegetation type, and connectivity

的254.80 km²增加到2023年的261.15 km²。水体覆盖变化不大, 从2017年的3.23 km²下降到2023年的3.21 km², 这一期间的净变化很小, 仅减少0.02 km² (图8)。与城市区域的等量增加相对应, 表明水域面积相比绿地更不容易受到城市发展的影响。

4 讨论

城市聚落对自然环境的影响及其对人类福祉的多尺度含义紧密依赖于技术和社会响应^[13]。近年来, 成都经历了大规模城市建设, 以新住宅社区和商业区的建设为标志, 这些区域已经扩展到其邻里^[30-31]和毗邻城市的周边地区。值得注意的是, 成都在建设公园城市示范区的

实践中, 战略性地规划了UGI体系 (图9), 这使得成都目前在中国主要城市中拥有较高的绿地覆盖率。

此外, 由于在获取特定生态系统服务子集的精确定量数据方面存在一定限制, 相关组织机构无法提供全面数据, 信息缺失导致显而易见的数据和模型局限。面对这些困难, 研究选择依托遥感实时数据对该地区进行精准环境模型构建, 具有一定创新意义。基于此研究获得的参数, 可以得出的结论为: (1) 直到2022年, 成都的中心地区经历了城市化密度和建设活动的显著增加。然而在2023年观察到城市绿地的显著扩张, 这一转变归因于UGI在城市中的重要性受到的充分认识、推动UGI和ES增强的国家战略和地方政策的实施, 以及全社会对实现“双碳目标”的切实努力。(2) 与其他地区相比, 成都南部区域地形变化相对较大。在这些特定区域, UGI发挥了更高质量的作用。

热点分析有助于理解UGI和ES的空间异质性, 识别资源丰富或稀缺的区域, 并突出需要加强或保护的地区。ES和UGI研究中的空白将成为未来研究的可能方向, 并划定了未来研究的优先领域, 分为三个主要领域: 需要更深入地研究UGI的扩展空间和ES; 需要更系统的数据收集以改进研究设计, 进一步将ES整合到包括UGI适用性和成本效益分析的综合评估中。

由于人工智能和遥感分析等技术的不断发展, 未来可能基于更精确的数据和参数以获得更科学全面的环境模型, 来提高操作的准确性。除了物理环境的考量之外, 还可以加强社会需求维度的评价。同时更广泛地纳入来自地方性不同职能机构的信息, 提供包含城市热岛、空气质量和生物多样性等因素的更准确评估。最后, 通过比较与案例样本类似的地点和城市发展, 可以获得更稳定的分析。

5 结论

根据InVEST模型结果显示, UGI在成都主城区的温度调节中具有重要作用, 具体表现为: (1) UGI缓解城市热岛效应。研究表明植被密集的区域平均温度降低约2.5°C, 显示了植被在缓解城市热岛效应中的作用。(2) UGI有效减少地表径流, 从而缓解洪水风险。植被覆盖区域可以减少多达30%的径流, 强调了在城市规划中纳入绿色空间以管理洪水风险的重要性。(3) UGI在土壤保护中起着关键作用。在植被覆盖较多的区域, 土壤侵蚀减少多达25%, 展示了植被在促进土壤稳定性方面的有效性。同时, 热点分析和ANN分析突出了成都主城区生态系统服务的显著空间模式和分布。这些分析提供了关于UGI多功能

益处的宝贵见解，并强调了将这些元素整合到城市发展战略中的必要性。

综上所述，本研究借助遥感解译与评估，展示了UGI对ES在时间和空间维度的支持和相互影响。对成都主城区UGI的研究，结合生态系统服务模型与多标准分析及服务受益区的评价，深入描绘了UGI的空间分布。研究结合定性和定量方法，应用ES模型，揭示了UGI与ES质量之间的复杂相互作用，提出了针对成都的UGI优化策略，建议推进绿地的整合和可持续设计与城市景观的深度结合。建议结合成都市各个区域中，UGI体系可用参数量最多的部分，在提升ES效能的规划和建设行动中，灵活采用生物多样性森林恢复、保护现有的城市公园和开发新的城市公园以及保护和恢复自然湿地等策略。同时这项以成都市为研究对象的综合分析，包括识别热点和冷点、评估碳储存量和考虑人口动态，对世界各地具有类似空间多样性的城市景观，进一步实现可持续发展，也提供了具有现实意义的支持。

注：文中图表均由作者绘制。

参考文献

- [1] 胡庭浩, 常江, 拉尔夫-乌韦·恩博. 德国绿色基础设施规划的背景、架构与实践[J]. 国际城市规划, 2021, 36(1): 109-119.
- [2] HOEK G, KRISHNAN R M, BEELEN R, et al. Long-term Air Pollution Exposure and Cardio-respiratory Mortality: A Review[J]. Environmental Health, 2013, 12: 43.
- [3] ROSENBERG P, KANO M, LUDFORD I, et al. Global Report On Urban Health: Equitable, Healthier Cities for Sustainable Development[Z]. Geneva: World Health Organization, 2016.
- [4] EIGENBROD F, BELL V A, DAVIES H N, et al. The Impact of Projected Increases in Urbanization on Ecosystem Services[J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2011, 278(1722): 3201-3208.
- [5] BOLUND P, HUNHAMMAR S. Ecosystem Services in Urban Areas[J]. Ecological Economics, 1999, 29(2): 293-301.
- [6] CHANG Q, LIU X, WU J, et al. MSPA-based Urban Green Infrastructure Planning and Management Approach for Urban Sustainability: Case Study of Longgang in China[J]. Journal of Urban Planning and Development, 2015, 141(3): a5014006.
- [7] LOURDES K T, GIBBINS C N, HAMEL P, et al. A Review of Urban Ecosystem Services Research in Southeast Asia[J]. Land, 2021, 10(1): 40.
- [8] CAO W, HUANG L, HU Y, et al. Temporal and Spatial Features of Urban and Construction Land in Chengdu City, China[C]// IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2019: 6515-6518.
- [9] 姚映, 杜春兰. 绿色基础设施与公园城市共生关系研究[J]. 园林, 2021, 38(7): 74-81.
- [10] 吴晓, 周忠学. 城市绿色基础设施生态系统服务供给与需求的空间关系——以西安市为例[J]. 生态学报, 2019, 39(24): 9211-9221.
- [11] HAMEL P, GUERRY A D, POLASY S, et al. Mapping the Benefits of Nature in Cities with the InVEST Software[J]. Npj Urban Sustainability, 2021, 1(1): 25.
- [12] 蒋迪. 绿色基础设施网络下的广东省鹤山市古劳水乡空间优化策略研究[J]. 园林, 2021, 38(3): 92-99.
- [13] BASNOU C, PINO J, TERRADAS J. Ecosystem Services Provided by Green Infrastructure in the Urban Environment[J]. CABI Reviews, 2015, 10(4): 1-11.
- [14] VAN LANGEVELDE F, VAN DER KNAAP W G M, CLAASSEN G D H. Comparing Connectivity in Landscape Networks[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 1998, 25(6): 849-863.
- [15] 肖华斌, 郭妍馨, 王玥, 等. 我国绿色基础设施空间响应与规划技术研究进展与展望[J]. 园林, 2022, 39(3): 54-62.
- [16] RICHARDS D R, FUNG T K, BELCHER R N, et al. Differential Air Temperature Cooling Performance of Urban Vegetation Types in the Tropics[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 50: 126651.
- [17] ZARDO L, GENELETTI D, PÉREZ-SOBA M, et al. Estimating the Cooling Capacity of Green Infrastructures to Support Urban Planning[J]. Ecosystem Services, 2017, 26: 225-235.
- [18] USDA, NRCS. Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall[M]// National Engineering Handbook. Washington, D. C.: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2004.
- [19] JONES J I, MURPHY J F, COLLINS A L, et al. The Impact of Fine Sediment On Macro-Invertebrates[J]. River Research and Applications, 2012, 28(8): 1055-1071.
- [20] TAYLOR K G, OWENS P N. Sediments in Urban River Basins: A Review of Sediment-Contaminant Dynamics in an Environmental System Conditioned by Human Activities[J]. Journal of Soils and Sediments, 2009, 9: 281-303.
- [21] LOURDES K T, HAMEL P, GIBBINS C N, et al. Planning for Green Infrastructure Using Multiple Urban Ecosystem Service Models and Multicriteria Analysis[J]. Landscape and Urban Planning, 2022, 226: 104500.
- [22] TAPPERT S, KLÖTI T, DRILLING M. Contested Urban Green Spaces in the Compact City: The (Re-) Negotiation of Urban Gardening in Swiss Cities[J]. Landscape and Urban Planning, 2018, 170: 69-78.
- [23] YIN K, WANG R, AN Q, et al. Using Eco-Efficiency as an Indicator for Sustainable Urban Development: A Case Study of Chinese Provincial Capital Cities[J]. Ecological Indicators, 2014, 36: 665-671.
- [24] DONG Q, CAI J, CHEN S, et al. Spatiotemporal Analysis of Urban Green Spatial Vitality and the Corresponding Influencing Factors: A Case Study Of Chengdu, China[J]. Land, 2022, 11(10): 1820.
- [25] LIU Z, CAO H. Spatio-Temporal Urban Social Landscape Transformation in Pre-New-Urbanization Era of Tianjin, China[J]. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 2017, 44(3): 398-424.
- [26] CHAKRAVORTY S. Identifying Crime Clusters: The Spatial Principles[J]. Middle States Geographer, 1995, 28: 53-58.
- [27] 杨柳琪, 周燕, 罗佳梦, 等. 基于时空演变分析的武汉市城市蓝绿系统空间格局及其与城市发展的协同关系研究[J]. 园林, 2022, 39(7): 66-74.
- [28] 戴代新, 张焜, Albert Fekete. 布达佩斯绿色基础设施规划脉络、框架与启示[J]. 园林, 2024, 41(3): 13-22.
- [29] 张炜. 城市绿色基础设施的生态系统服务评估和规划设计应用研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- [30] KWEON B S, ELLIS C D, LEIVA P I, et al. Landscape Components, Land Use, and Neighborhood Satisfaction[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2010, 37(3): 500-517.
- [31] 吴远翔, 王瀚宇, 金华, 等. 城市绿色基础设施的生态系统服务评估模型研究[J]. 城市建筑, 2018, 15(33): 31-34.