

DOI: 10.5846/stxb201810212273

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.生态学报,2019,39(24):9211-9221.

Wu X, Zhou Z X. Spatial relationship between supply and demand of ecosystem services through urban green infrastructure: case of Xi'an City. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(24): 9211-9221.

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

吴 晓,周忠学*

陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119

摘要:城市绿色基础设施(Urban Green Infrastructure, UGI)是城市自然景观和生态环境的主要营造者,为居民提供关键的生态系统服务。探讨 UGI 生态系统服务供给及其需求之间的空间关系,对城市生态建设和绿地系统规划具有重要科学意义。本文运用生态系统服务测算的方法基于人口、GDP 以及土地利用数据构建需求测算模型,对西安市建成区 UGI 的生态系统服务供给与需求的空间格局进行研究,并分析了城市各功能区内 UGI 生态系统服务供给与需求的空间关系。结果表明:西安市建成区 UGI 生态系统服务供给总价值为 4.23 亿元;生态系统服务供给从研究区边缘向中心区逐渐减少,而生态系统服务需求表现出相反的格局,在空间上明显不一致,并且在城市各功能区内差别显著;西安市建成区 UGI 生态系统服务供给与城市对生态系统服务需求在空间分布上不相匹配。因此为了实现城市的生态环境与经济社会的可持续发展,迫切需要通过合理的 UGI 建设使生态系统服务供需趋于协调。

关键词:城市绿色基础设施;生态系统服务;供给;需求;空间关系

Spatial relationship between supply and demand of ecosystem services through urban green infrastructure: case of Xi'an City

WU Xiao, ZHOU Zhongxue*

School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

Abstract: Urban Green Infrastructure (UGI) is a main builder of urban natural landscape and ecological environment by providing the key ecosystem services for residents. Discussing the spatial relationship between supply and demand of UGI ecosystem services is of great scientific significance for urban ecological construction and green space planning. Based on population, GDP, and land use data, this paper explored the spatial pattern between supply and demand of UGI ecosystem services in built-up area of Xi'an, and the spatial relationship between supply and demand of UGI ecosystem services in four urban functional areas were also analyzed. The results showed that the total UGI ecosystem service supply in Xi'an built-up area was 423 million yuan. The supply of ecosystem service gradually decreased from the edge of the study area to the central area, while the demand of ecosystem service showed the opposite change. The supply and demand of UGI ecosystem services in Xi'an had a significant negative spatial correlation, and there were significant differences among different functional areas of the city. The supply of UGI ecosystem services in built-up areas did not match the spatial distribution of urban demand of ecosystem services. It is urgent to coordinate the supply and demand of ecosystem services through rational

基金项目:国家自然科学基金项目(41271550)

收稿日期:2018-10-21; 网络出版日期:2019-09-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhouzhx@snnu.edu.cn

UGI construction.

Key Words: urban green infrastructure; ecosystem services; supply; demand; spatial relationship

当前中国城镇化率超过 58%,仍处于快速发展阶段,随着越来越多的人口进入城市,城市土地使用紧张,城市绿地空间遭到挤压,加之在过去城市发展中对绿地空间建设不够重视,城市自然景观减少,使城市生态环境问题突出,城市经济社会发展的可持续性受到挑战。城市绿色基础设施(Urban Green Infrastructure, UGI)作为现代城市重要的景观构成,在营造城市自然环境、维系城市生态平衡^[1]、提升城市品味与形象以及应对全球气候变化^[2]等方面具有重要的作用。城市绿色基础设施(UGI)是城市内部及其周边的自然区域或者人工及半人工的绿色植被、水域等^[3],还包括各类未开发地和保护区等开放性空间,这些区域相互连接而构成的绿色空间网络^[4-5],并且根据其在生态系统中的作用分为生态源地(Hubs)和不同等级的生态廊道(Corridors)^[6],在提供自然生态服务与人文服务以及城市生命支撑与保障^[7]、维持区域人与自然和谐具有重要作用。

关于绿色基础设施的研究最早出现在 19 世纪 50 年代^[8],随后 UGI 的空间规划、体系构建以及评估框架得到广泛的研究,近年来重点转向 UGI 生态系统服务与人类福祉的研究。国际上对 UGI 的调节服务、文化服务以及供给服务和支持服务等开展了大量研究,集中在 UGI 改善城市空气质量^[9]、固定二氧化碳^[10]、降低地表温度^[11-12]、缓解城市洪涝^[13]等方面;此外,在保护和提高生物多样性^[14]、文化服务^[15]、食物供给^[16]等方面也有学者进行许多有价值的研究。当前有关生态系统服务供给与需求问题成为国际生态系统服务研究的热点,如 Burkhard 等^[17]对生态系统服务供给与需求进行了定义,认为生态系统服务供给是生态系统在特定时空条件下提供实物与服务的能力,而生态系统服务需求是指当下一段时间内被消耗或使用的总的生态系统实物或者服务;Beichler^[18]建立了城市区域文化生态系统服务空间分布、供需关系以及脆弱性评价的综合方法;Nedkov 和 Burkhard^[19]基于多源数据对保加利亚北部 Malki Iskar 河流域洪水调节服务的供需关系进行了分析;Schulp 等^[20]对欧盟地区生物授粉服务的供需进行了研究,并分析了国家政策对生物授粉服务供需关系的影响;Syrbe 和 Grunewald^[21]尝试对六种不同生态系统服务供需场景下的生态系统服务供给与需求研究指标进行确定。这些研究主要对某一种或某一类生态系统服务供给与需求进行分析,综合研究较少;以流域、盆地以及行政区等尺度的研究居多,而对街道办、社区与居民小区等小微尺度的研究较少。国内生态系统服务供需研究也形成了一系列成果,如严岩等^[22]基于生态系统服务供给、需求和消费特征的探讨,提出了生态系统服务供需关联的研究框架,并梳理了生态系统服务供给和需求的量化指标与方法;王大尚等^[23]分析了生态系统服务供给与消费的不确定性与多尺度关联特征;白杨等^[24]以白洋淀流域为例,基于生态系统服务的产生、传递和消耗的过程定义了生态系统服务的潜在供给、实际供给和人类实际需求,引入生态系统服务的供需比和供给率指标对生态系统服务空间供需关系进行分析;王文美等^[25]研究了天津市滨海新区生态系统服务,采用“功能当量”法测算生态系统服务供给量,建立了由物质文化(人均粮食、蔬菜需求和风景名胜用地需求)、生态安全(日常用水量、水土保持率和生物多样性指数)和环境质量(环境舒适度、水质达标率、空气质量和人均绿地面积)三个方面构成的生态系统需求测算指标体系;彭建等^[26]构建了以土地利用开发程度、人口密度和地均 GDP 表征的生态系统服务需求量测算指标,基于生态系统服务供需关系提出了广东省绿地生态网络建设分区方案;除此之外,顾康康^[27]、石忆邵^[28]、孟士婷等^[29]在不同类型生态系统服务需求的测算方法与地区生态系统服务供需空间分异研究方面也取得了一些进展。但总体上当前对生态系统服务供需研究还不够深入,尤其是在需求指标的选取和量化以及测算模型的构建与精度提高上仍然存在一定困难,以 UGI 为对象对生态系统服务供需进行综合分析的研究较少,而且 UGI 具有重要的尺度特征,街道办作为城市管理以及规划建设的重要单元,从街道办尺度探讨城市不同功能区内部 UGI 生态系统服务供需研究的时空关系,对于推动城市生态建设具有重要意义。

本文以西安市为例,拟运用生态系统服务理论与方法测算绿色基础设施的生态系统服务供给能力,在街道办尺度上采用人口、GDP 以及土地利用指标构建生态系统服务需求测评模型,对西安建成区 UGI 生态系统服务供给与需求的空间关系进行分析,这对探索城市生态系统服务供给与需求关系,推动 UGI 规划与建设,构建城市区域生态安全体系与保障区域经济社会的可持续发展具有一定的理论和现实意义。

1 研究区概况

西安市地处关中平原中部,介于 $107^{\circ}40'—109^{\circ}49'E$, $33^{\circ}42'—34^{\circ}45'N$ 之间。地势自西南向东北方向倾斜,主要由渭河冲积平原、黄土台塬和秦岭山地构成;属温带半湿润大陆性气候,年均气温 $13.0—13.7^{\circ}C$,年均降水量为 $522.4—719.5mm$ 。西安是我国著名的古都和中心城市、区域性中心城市以及丝绸之路经济带的新起点,城市发展历史悠久。1990s 以来城市化快速推进,人口大规模聚集,城市用地迅速扩张,2017 年西安市常住人口超过 960 万,规划 2020 年主城区人口规模达到 1000 万,市域人口达到 1500 万,城市化仍将加速推进。随着西安城市的扩展与人口集中,城市热岛、霾等问题日益突出,UGI 覆盖明显不足,近年来西安市实施了一些列绿地建设项目,如浐灞国家湿地公园、沣河生态景区、园林绿化景观提升工程、国家生态园林城市建设等。2016 年西安城市绿化面积达到 $225km^2$,建成区绿化覆盖率达到 40%,但由于绿化植被品种单一、绿地覆盖率低、空间分布极不平衡等,为全市区居民提供自然景观与生态系统服务的能力有限。今后,随着“一带一路”倡议的落实、关中平原城市群和大西安建设,西安市人口及城市用地将进一步快速扩张,优化和构建 UGI 空间格局对建设宜居城市、保障城区生态安全尤为迫切,因此,探讨西安市 UGI 生态系统服务供给与需求之间的空间关系具有重要的实践意义。

2 研究方法

2.1 数据来源与处理

由于当前学术界对城市建成区的划分方法还不统一,在本研究中以建设用地超过 60% 的区域^[30]并结合西安城市绿地系统规划布局状况等确定研究区范围。研究区绿色基础设施数据的获取主要基于“高分一号”影像,下载自国家基础科学数据共享服务平台,利用 ArcGIS10.2 软件目视解译进行提取,参考野外调查和近几年西安市土地利用变化情况进行精度验证,主要包括林地、园地、耕地、草地、水域五类,栅格化后形成栅格大小为 $30m \times 30m$ 的 UGI 的空间分布(图 1)。人口数据来源西安市第六次(2010)人口普查数据,经济社会数据来源西安统计年鉴(2018)。

另外,研究中地表温度反演所需数据来自 Landsat8,从中科院国家基础科学数据共享服务平台下载,经过辐射校正和大气校正后,基于辐射传导法进行地表温度反演。

2.2 生态系统服务供给测算

根据研究区特点以及前人对本区域的相关研究成果,以千年生态系统评估(MA)对生态系统服务的分类为基础,结合西安市 UGI 的主要生态系统类型和特征,将本研究区 UGI 生态系统服务确定为 3 大类共 6 项,并构建了生态系统服务供给的测评指标(表 1)。

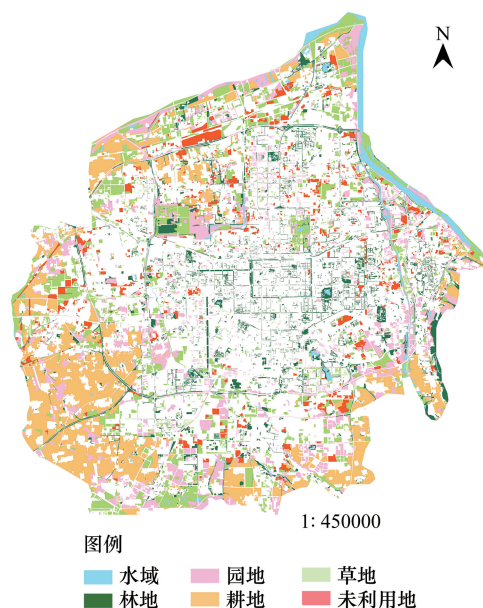


图 1 西安市 UGI 分布图

Fig.1 Study area UGI distribution

表 1 生态系统服务测评指标
Table 1 Indicators for assessment of ecosystem services

服务类型 Services	测评指标 Index	指标含义 Meaning	测算方法 Methods
调节服务 Regulating services	固碳释氧	植被通过自身光合作用吸收 CO ₂ 同时释放 O ₂ , 实现大气的平衡稳定。	碳税法、工业制氧法
	空气净化	植被通过自身叶片的生理结构吸附和滞留空气中的 SO ₂ 、氮氧化物以及灰尘等, 实现空气净化。	人工治理费用法
	高温调节	夏季高温条件下, 植被通过蒸腾作用、遮阴作用缓解城市热浪。	降温费用法
	水源涵养	不同的植被通过截留、拦蓄、吸收和存储作用减少降雨冲刷、减缓地表径流, 同时增加下渗, 补充地下水等。	综合蓄水法
文化服务 Cultural services	娱乐文化	在街道、社区以及城市公园等为市民提供游憩、休闲、娱乐以及文化教育等功能	旅行费用法
支持服务 Supporting services	生物多样性保护	为小动物的栖息、繁衍、以及迁徙等提供栖息地和庇护所, 维持区域生物多样性	保护区模拟法

2.1.1 空气净化服务测算

空气净化服务是指植被通过吸收、吸附和降解大气中污染物的作用, 不同植被类型的叶片生理特征不同, 吸附和滞留空气污染物的能力也各有差异, 本研究主要考虑不同植被类型对 SO₂、NO_x、HF 以及灰尘的净化服务价值。

$$S_{\text{pollu}} = \sum_{j=1}^4 V_{ij} u_j \tag{1}$$

式中, S_{pollu} 表示单位面积 UGI 的年空气净化服务价值; V_{ij} 表示单位面积第 i 种 UGI 类型能够吸附的第 j 种空气污染物的物质质量; U_j 表示人工净化单位质量第 j 种空气污染物的花费, 根据《2017 年排污费征收标准管理办法》确定 SO₂、氮氧化物的处理费用标准分别为 0.60 元/kg、0.63 元/kg, HF 为 0.87 元/kg, 灰尘为 0.15 元/kg。

2.1.2 高温调节服务测算

植被通过冠层的蒸腾作用能有效降低空气温度, 同时通过遮光作用使周边一定范围内温度降低, 所以夏季植被覆盖区地表温度要显著低于建筑区^[31], 这种降温作用就是植被的高温调节服务。地表温度与近地面大气温度之间具有显著的线性相关性^[32], 地表温度可以间接反映近地面大气温度, 因此可以用植被覆盖区地表温度与城市建筑区的地表温度之差来评估植被的高温调节服务, 所用地表温度通过遥感影像反演获取, 最终构建植被的高温调节服务测算模型。

$$S_{\text{temp}} = (T_i - T_b) \cdot \xi \cdot C \tag{2}$$

式中, S_{temp} 表示单位面积不同类型 UGI 的年高温调节价值; T_i 表示第 i 种 UGI 覆盖区的地表温度; T_b 表示建筑区的地表温度; ξ 表示近地面 2m 处大气温度相对地表温度的变化率; C 表示单位空间人工降温花费, 采用目前环保空调降温系统的平均成本 13.17 元/m³, 年降温时间按 60d、每天 10h 计算。

2.1.3 其他生态系统服务测算

本研究的固碳释氧、水源涵养、生物多样性保护和娱乐文化等生态系统服务的测算主要参考李梦桃等^[30,33]人研究成果。

2.3 生态系统服务需求模拟

当前对生态系统服务需求的测评主要采用一些代用指标, 如综合考虑人口密度、土地开发程度、地均 GDP^[26,34]、夜间灯光指数^[27]等经济社会数据, 也有学者通过生态系统服务指标的重要性和服务可替代性等的主观偏好参数来进行衡量^[35]。居民是 UGI 生态系统服务的需求者与消费者, 经济发展、土地的利用状况在很大程度上会影响 UGI 生态系统服务需求, 因此, 本文选择人口密度、建设用地占比和地均 GDP 作为代用指标

来模拟测度 UGI 生态系统服务需求,并根据影响程度分别对人口密度和地均 GDP 以及土地利用情况分别赋权为 0.4 和 0.6。陕西省实施退耕还林的面积较大,这对地表覆盖的影响较大,而退耕还林可以认为是人们放弃部分耕地生态系统服务,获取最大生态系统服务的过程,所以用陕西省退耕还林补偿标准以及西安市人均耕地面积修正人均生态系统服务需求价值,最终构建生态系统服务需求综合模型。

$$D = 0.4(P_d \cdot B \cdot R) + 0.6 \frac{L_{js}}{L_j} \cdot \ln GDP_j \quad (3)$$

式中, D 表示各街道办生态系统服务需求; P_d 表示街道办人口密度; B 表示陕西省退耕还林补偿标准,包含生活补助:1350 元/hm², R 表示西安市人均耕地面积,约 0.03hm²/人; L_j 表示街道办总面积, L_{js} 表示街道办建设用地面积; GDP_j 表示各街道办的地均 GDP。

此外,对 UGI 生态系统服务供给与需求空间关系的定量分析,运用 SPSS 软件对各类 UGI 生态系统服务供需测评结果进行相关性分析,对西安市建成区绿色基础设施的生态系统服务供给与需求的空间关系进行探讨。

3 结果分析

3.1 UGI 生态系统服务供给空间格局分析

本研究区面积为 811.65km²,其中 UGI 所占面积为 304.47km²,占西安市建成区面积比为 37.51%。UGI 集中分布在研究区边缘地带,斑块面积大而集中;而中心区核心斑块数量少,斑块破碎化程度高,斑块连通性微弱,城市的方格状道路建设致使较大规模的景观廊道缺乏,主要廊道分布在研究区东部的沣河沿线、中心区域古城墙护城河沿线以及汉城湖等地区,此外,城市二环线沿线绿化带构成的廊道较为完整。

通过计算得到 UGI 生态系统服务的总供给达到 4.23 亿元,UGI 及生态系统服务分类测算结果如(表 2)。其中林地与园地所提供的生态系统服务在总供给中占有最重要地位,而在各类生态系统服务供给中的固碳释氧供给与水源涵养服务最为突出。

表 2 西安市建成区各类 UGI 生态系统服务供给/万元

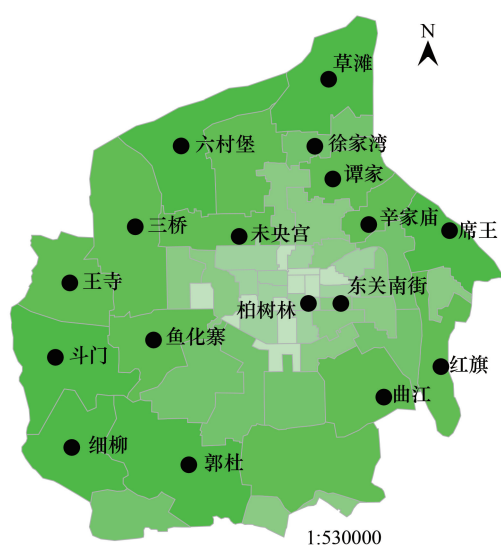
Table 2 Total supply for different type of green infrastructure ecosystem services in the built-up area of Xi'an

各类型价值 Value	林地 Forest	园地 Garden	耕地 Arable land	草地 Grass land	水域 Water	合计 Total
固碳释氧 CO ₂ absorption and O ₂ release	2317.27	2270.95	2944.59	1767.68	256.77	9557.26
空气净化 Air purification	3043.11	1128.51	316.20	32.73	93.37	4613.92
高温调节 High temperature regulation	1587.54	1839.05	1333.96	1112.99	108.93	5982.47
水源涵养 Water conservation	1882.54	2110.73	899.19	990.23	4805.51	10688.20
娱乐文化 Entertainment and culture	1252.80	1159.308	24.90	82.578	1703.03	4222.60
生物多样性保护 Biodiversity conservation	1917.47	2298.81	1067.17	1350.31	586.68	7220.45
合计 Total	12000.73	10807.36	6586.01	5336.52	7554.29	42284.91

受 UGI 主要斑块空间格局的影响,研究区生态系统服务总供给的空间分布表现出从中心区域向周边逐渐递增的特点(图 2、图 3)。

研究区边缘的草滩、徐家湾、辛家庙和红旗等街道办 UGI 斑块面积较大,而且濒临渭河,沿线生态廊道保护较好,建设用地占比相对较小,而如未央宫街道办、柏树林街道办等受益于大面积遗址保护区和城市公园,

这些遗址保护区或者公园占地面积广,植被覆盖率高,是重要的生态源地,生态系统服务总供给服务较高,单位面积提供的生态系统服务供给较高。但是,从居民对服务供给的可获得性以及通达性来看,某些生态系统服务能够影响整个研究区,如城墙的娱乐文化服务具有全局性作用。水源涵养供给在各类服务供给中异常突出,主要贡献来源为水域和园地、林地,水域主要分布于渭河、灞河沿岸以及大型公园如曲江公园等,因此草滩、席王、六村堡等区域水源涵养服务偏高。而汉城湖遗址公园、大唐芙蓉园、曲江公园等地方,水域面积相对较大,这些水域还在文化娱乐等方面也发挥了重要作用。园地和林地面积基本都在 20hm^2 以下,核心斑块严重缺乏,面积相对较大园地和林地斑块主要分布于大型公园,如兴庆公园、汉长安城遗址公园等,此外城市环线的绿化带以及灞河、沣河沿岸也具有较高的水源涵养服务。在城市中心区,由于天然林地少,幼林、疏林占比大,且大部分休闲绿地为草皮和低矮灌木,这些植被单位面积上提供的生态系统服务供给价值没有自然成年林高,因此,水源涵养、气体调节、热岛调节等方面服务供给远不如研究区边缘地区。

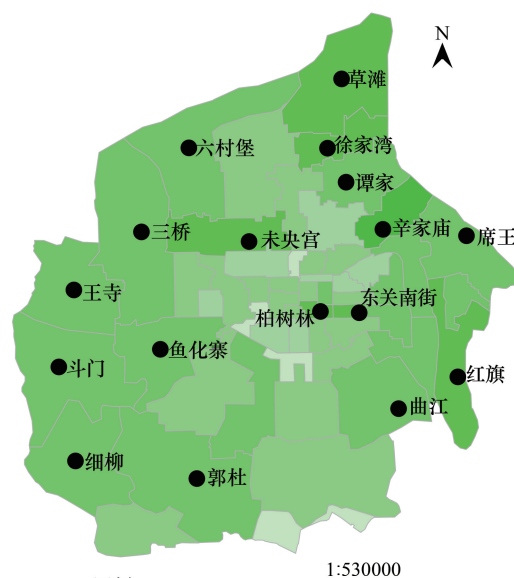


图例
生态系统服务总供给/ $\times 10^4$ 元

< 60	150—550	1100—2200
60—150	550—1100	> 2200

图2 UGI 生态系统供给总量图

Fig.2 Distribution of total UGI ecosystem services supply



图例
地均供给/($\times 10^4$ 元/ km^2)

< 10	20—40	70—140
10—20	40—70	> 140

图3 UGI 生态系统服务地均供给图

Fig.3 Distribution of UGI ecosystem services supply density

大型 UGI 斑块能够较为完整地体现其生态系统服务的局部临近性、使用迁移性以及全局性特点,其空间布局往往能够较明显地提高生态系统服务供给,因而大型遗址公园在综合生态系统服务供给上表现突出,尤其是文化娱乐供给具有全局性。通过计算,统计了六个大型遗址公园的娱乐文化价值超过 100 万元,以大明宫遗址公园为例,位于研究区中心以北,公园面积为 3.2km^2 ,涵盖了较大面积的水面,景色优美,被看作是西安市的“城市中央公园”,为全市居民提供了良好的休憩娱乐以及文化创意普及场所,同时它也是丝绸之路文化遗产的重要组成部分。西安市政府对大明宫遗址公园进行了较为全面的保护与建设,充分发掘其文化价值内涵,以其具有深厚历史背景的文化遗迹和优美的古城风景,吸引无数游客,发挥了重要的生态系统服务功能。

3.2 UGI 生态系统服务需求的空间格局分析

经济社会的发展需要消耗生态系统提供的各类实物与服务,不同区域的经济社会发展状况对生态系统服务的需求不同,而人口密度、建设用地占比以及地均 GDP 等指标能够最为直接地表现不同区域对生态系统服务需求程度。通过制图得到各街道办人口密度、建设用地占比、地均 GDP 以及综合需求的空

4)、(图 5)。统计得到人口密度超过 1 万人/ km^2 的街道办共有 32 个,占研究区总人口数的 57.62%,集中于研究区中心区域,人口最为密集,而研究区边缘区域尤其是西南部和北部区域几个街道办,人口密度明显低于中心区域。长期以来,中心区域是商贸活动最为频繁的地区,经济产出最多,单位面积 GDP 产出最高,而人口与经济活动的集中也促使建设用地高度集中,导致研究区中心的各街道办建设用地占比明显高于边缘区域,形成了中心区与边缘区在建设用地占比上的两极分化。以小寨街道办为例,街道办面积为 7.1km^2 ,而人口密度达到 38911 人/ km^2 ,是西安市商业、服务业以及文化娱乐中心,同时这里也是建设用地占比最高的几个街道办之一,生态系统服务需求多。

人口密度、地均 GDP 以及建设用地占比向中心区域的集中也使得生态系统服务综合需求向研究区中心区域集中,以柏树林街道办等为代表的区域是生态系统服务需求最高的区域,而在研究区边沿,生态系统服务需求显著降低,如草滩街道办等则是生态系统服务需求最低的区域。

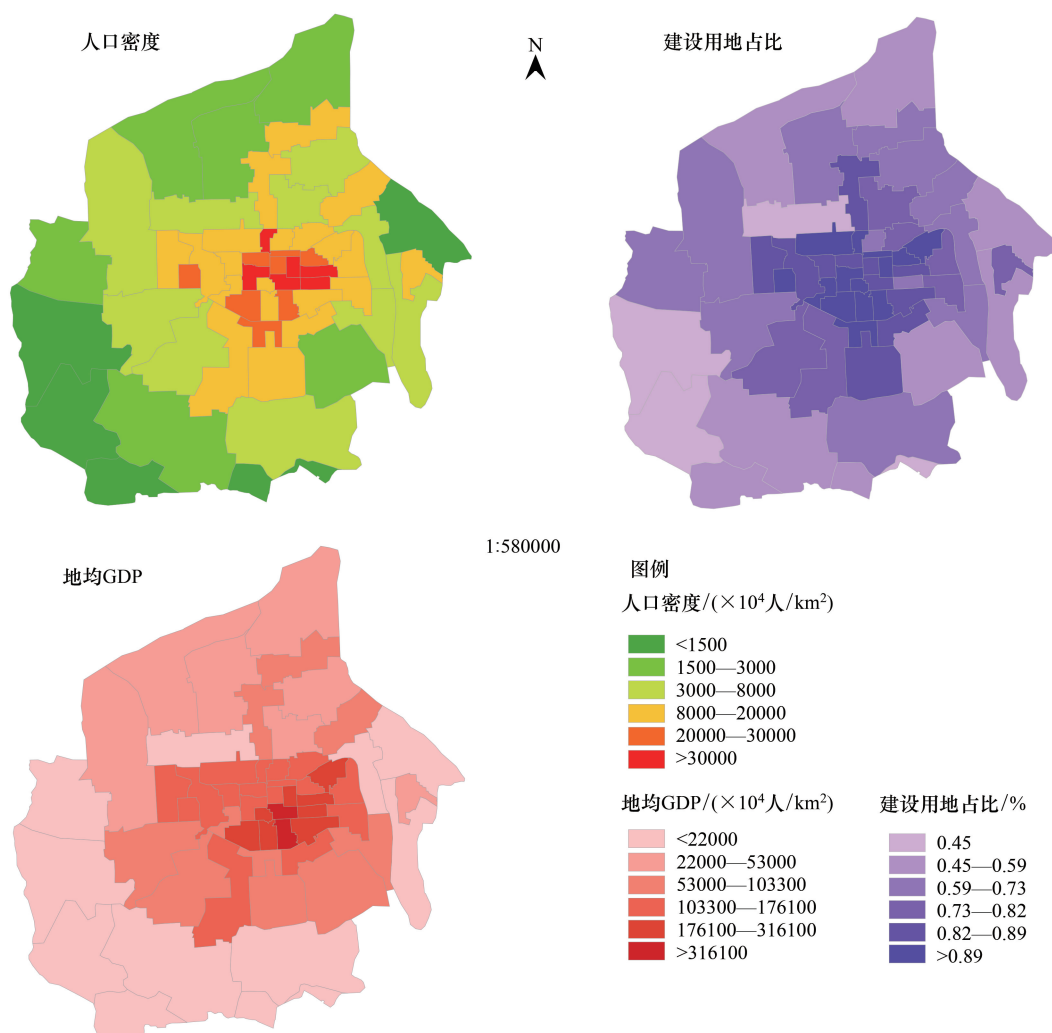


图 4 UGI 生态系统服务需求指标空间分异图

Fig.4 Population density, GDP per area and proportion of construction land

3.3 UGI 生态系统服务供需空间关系分析

参考西安市主城区规划与各个街道发展规划,将研究区的 56 个街道办划分为 4 个城市功能区(图 6)。对各个功能区内街道办的 UGI 生态系统服务各类供给与需求进行相关性分析,得到相关性系数表(表 3)。

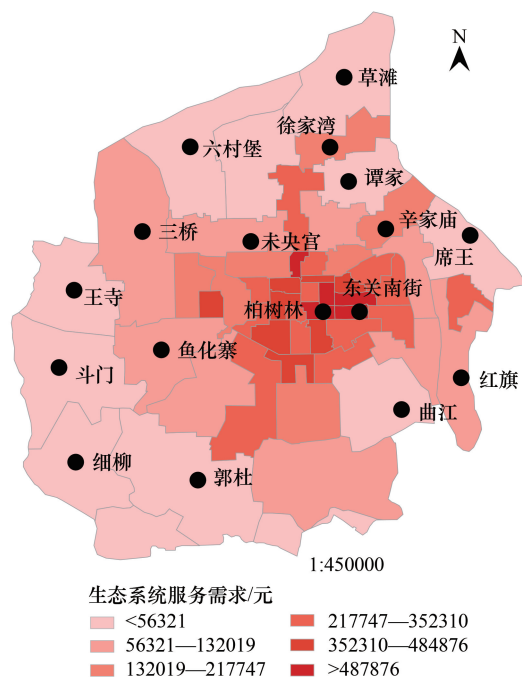


图5 各街道办 UGI 生态系统服务综合需求

Fig.5 Demand for UGI ecosystem services in streets

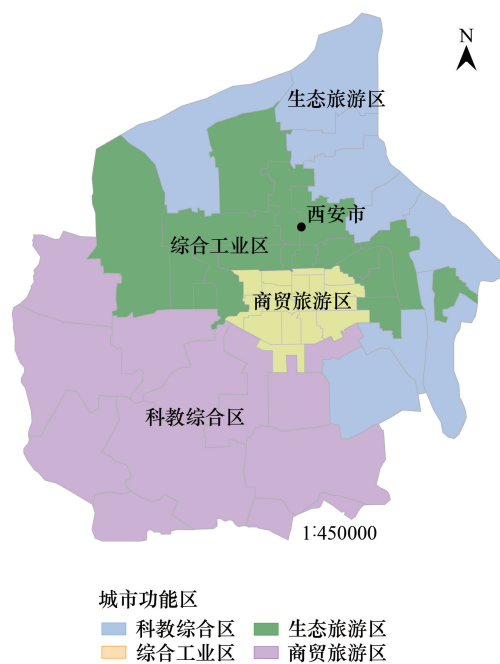


图6 城市功能分区图

Fig.6 Urban functional zoning

表3 UGI 生态系统服务各供给指标与需求相关系数表

Table 3 Correlation coefficient between demand and supply of UGI ecosystem services

	固碳释氧 CO ₂ absorption and O ₂	空气净化 Air purification	高温调节 High temperature regulation	水源涵养 Water conservation	生物多样性保护 Biodiversity conservation	娱乐文化 Entertainment and culture	总服务 Total ecosystem services
综合工业区 Comprehensive industrial zone	-0.509 *	-0.086	-0.520 *	-0.505 *	-0.517 *	-0.411	-0.454
科教综合区 Science and education zone	-0.789 **	0.674 *	-0.839 **	-0.758 **	-0.783 **	0.226	0.023
生态旅游区 Ecotourism zone	-0.426	0.056	-0.335	0.095	-0.362	0.144	0.830 **
商贸旅游区 Business and tourism zone	0.308	0.3	0.348	0.41	0.274	0.408	0.692 **
西安建成区 Built-up area	-0.626 **	0.233	-0.599 **	-0.270 *	-0.636 **	-0.14	-0.177

* 表示相关性在 0.05 水平上显著 (双尾); ** 表示相关性在 0.01 水平上显著 (双尾)

总体来看,西安市建成区各街道 UGI 生态系统服务总供给与需求总量之间的相关系数为-0.177,且未通过显著性检验,表明西安市 UGI 提供的生态系统服务与人们对生态系统服务之间不存在明确的空间相关。但是生态系统服务需求与各项服务供给之间普遍存在较强的负相关,相关系数在 0.6 左右,并有部分通过了显著性检验,表明不同的 UGI 生态系统服务供给与需求之间存在较显著的空间不匹配性,需求越大的区域供给反而比较小,这个与生态系统服务供给以及需求测算结果一致,从中心区向边缘区生态系统服务供给逐渐增加而生态系统服务需求逐渐降低。主要原因是长期以来城市发展理念落后,以西安古城墙为中心的老城区在发展过程中对 UGI 建设没有引起足够的重视,加之原有绿色植被遭到严重破坏,生态系统服务供给不足或者下降,而随着城市的扩展以及生态建设理念的融入,研究区边缘各街道办 UGI 的规划与布局增加,生态系统服务供给提高;另外,随着人口向城市中心区的高度集聚,人口密度、建设用地、经济产出普遍增加促使中心

区域对生态系统服务需求的增加。在各类生态系统服务中仅有娱乐文化服务供给未表现出明显相关性,其余类型 UGI 生态系统服务供需相关性上都表现得较为明显,这主要与研究区的各种历史遗址景区以及公园的分布有关,这些景区与公园的娱乐文化价值远高于的城市绿地公园,但是其空间分布缺乏规律性,从而使得这些景区和公园所在的街道办娱乐文化供给远高于其他街道办。

在不同城市功能区,不同生态系统服务的供给与需求之间的空间关系存在显著的差异。在综合工业区,大部分 UGI 生态系统服务供给与需求之间具一定的负相关性,尤其固碳释氧服务、高温调节服务、水源涵养服务以及生物多样性供需空间错位比较严重,相关系数绝对值均大于 0.5,在 0.05 水平上显著;而其他几项服务供需之间的相关系数较低且未通过显著性检验,其关系尚难以确定。该功能区内工业发展历史长,是西安市传统的工业单位聚集地,人口和工厂密集,建设用地连片,UGI 空间分布少,生态系统服务需求明显高于供给,表现出较强的空间错位。但是工业园区普遍占地较广,适合 UGI 的规划与布局,不仅可以增加 UGI 核心斑块的面积,还可以通过休憩小道的建设改善斑块之间的连通性。以固碳释氧、高温调节、水源涵养等服务的改善为目标,选择固碳释氧能力较强,气候调节能力强等的植物类型,同时为了应对工厂生产过程中可能出现的有害气体、废水、废渣等,选择性种植对有害物质的抗性或者净化能力较强的植物种群。

科教综合区主要分布在西安的南部,该功能区内固碳释氧、高温调节、水源涵养以及生物多样性保护的供需之间也存在显著的负相关关系,相关系数绝对值总体上高于 0.7,生态系统供给与需求之间的空间不平衡性更加显著。本区域内高校及科研机构聚集,分布有西安高新技术开发区、航空航天基地、诸多大学校区和大型住宅区,大部分地区为 1990s 以来西安市新发展起来的建成区,各种 UGI 分布较多,生态系统服务能力较强,但是在城市发展过程中人口的大量聚集,人口密度、建设用地快速增加,加大 UGI 生态系统服务需求,因而 UGI 生态系统服务供需不平衡比较严重。通过增强各科技园区、校园等的 UGI 设计,提高植被覆盖质量,同时抓住其靠近城市边缘的优势,加强与边缘地区的连通廊道的规划建设,推动生态系统服务从外部生态系统服务供给高的地区向区域内流动。在城市扩展的过程中加强对原有植被的保护,以及通过融合“城市森林大道”以及“重地被,弱中层,强上木”等道路绿化设计理念,在城市道路建设的过程中强化生态建设以增强生态系统服务供给。

在城市的商贸旅游区和生态旅游区,相关分析结果表明 UGI 生态系统服务供给与需求之间的空间相关性尚难确定。从分析结果来看,UGI 生态系统服务各供给指标与需求之间的相关性差异较大,但均没有通过显著性检验,即相关性分析结果不可靠。因此,在这两个城市功能区,UGI 生态系统服务供给与需求之间是否具有相关性尚不能确定。

商贸旅游区是西安的老城区和城市核心区,商业贸易发达,人口密度大、流动人口多,建设用地占比和地均 GDP 普遍高于其他功能区,而提供高水平生态系统服务的绿色基础设施分布较少,空间分布上呈现破碎的点状、线状格局,不同街道办内的 UGI 分布差别大,如有兴庆公园、长乐公园和环城公园,这些公园较大幅度地提高了其所在街道办生态系统服务供给,但大部分地区均呈空白,生态系统服务供给普遍较低。这个功能区内土地利用高度集中,更加不可能通过大面积的植树造林盖上 UGI 状况,但是通过建筑物的绿色改造,如外墙的藤本植物覆盖,绿墙和花墙的建设,加强屋顶绿化,在建筑物间隙穿插修建规模不等的景观绿植以及商铺店面内各类绿色盆栽的摆放,通过微观的调整增强生态系统服务供给。

生态旅游区主要分布在渭河以及灞河沿线,这些地方植被覆盖较高,自然植被较广,水域面积多,大部分地方作为城市文化产业公园,如曲江池、浐灞生态园、汉城遗址公园等,绿色基础设施较广,能够提供的生态系统服务较多,而且不同街道办的 UGI 分布程度差异很大,而且人口密度、地均 GDP 等对生态系统服务需求有重要影响,所以 GUI 生态系统服务供需在空间上很难匹配。但是总体上该区域的 UGI 基础条件最好,加上《大西安发展规划》中极力强调建设渭河滨水景观带以及浐灞沿线生态带的建设,生态系统服务供给有望能够继续提升。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 西安市建成区 UGI 总体呈边缘区 UGI 较好、中心区 UGI 面积小、斑块破碎的空间格局,其生态系统服务总供给超过 4.23 亿元,水源涵养作用以及废物处理服务占比最大,均在 20% 以上。总体上,绿色基础设施提供的生态系统服务具有从城市中心向外围逐渐递增的空间特点,市区各街道办之间也存在显著的差异。

(2) 西安市建成区人口密度、地均 GDP 以及建设用地占比均表现出明显的从周边向市中心逐渐递增的空间特点,也使得生态系统服务需求从边缘向中心区逐渐增加,受人口和产业经济空间分布的影响,生态系统服务的需求从边缘向中心区逐渐增加。

(3) 西安市建成区各街道办 UGI 生态系统服务供给总量与需求之间相关性仅为-0.177,但是固碳释氧、高温调节、生物多样性保护生态系统服务供给与需求之间相关性在-0.6 左右。综合工业区除娱乐文化服务以外其余各类生态系统服务供需之间具有较强负相关性,相关系数超过-0.5,而科教综合区除娱乐文化以外其余各类供给与需求之间的相关性显著,相关系数-0.8 左右,其余各功能区内生态系统服务各类供给与需求之间相关性不确定。

4.2 讨论

当前学术界对生态系统服务的研究主要偏重于供给方面,而生态系统服务流动以及生态系统服务受益主体划分等比较困难,因此,对生态系统服务需求的定量测评仍然是生态系统服务供需研究的难点,尤其以 UGI 为研究对象对城市不同功能区 UGI 生态系统服务供需空间关系的研究更少。本文从生态系统服务供给与需求的新视角,揭示了城市不同功能区内 UGI 及其生态系统服务供给以及受人口密度等因素影响下的生态系统服务需求之间的空间规律,这对探讨城市发展过程中的城市生态建设与人口产业空间规律具有一定的科学意义。

由于目前对 UGI 生态系统服务供需的研究仍然不够完善,本文只根据研究区特点选择了 UGI 提供的几个主要生态系统服务没有考虑更多的服务类型,比如洪水调节、花粉过敏等,在需求的测算方面,只考虑了人口密度、地均 GDP 以及建设用地占比情况作为需求测算的考虑因素,没有考虑更多的因素如居民偏好等方面,因而,对生态系统服务需求的测算指标也有待进一步完善。

西安市建成区 UGI 不同类型生态系统服务供给与需求的空间分异明显,尤其是研究区中心区域形成了 UGI 生态系统服务需求的高值区和供给的低值区,表明西安市的 UGI 建设与人口及产业的空间分布存在空间错位。为了促进生态系统服务供需区域平衡,应当着重强调 UGI 的规划与建设。在当前无法显著增加建成区内部 UGI 用地的现实条件下,首先可以提高现有景观斑块质量,如 2018 年西安市实施的春季植树增绿计划,通过对原有的 UGI 进行提升改造,强化部分地区的植被覆盖度;此外,为增强夏季高温时节的温度调节作用,适当增加冠幅较大树种的种植;同时通过加强针叶林与灌木林的立体搭配加强对粉尘吸收作用等。其次,通过完善和修复现有廊道提高 UGI 斑块之间的连通性,加强生态系统服务从供给高值区向低值区的流动,如通过地下通道以及立交桥等工程措施将研究区唐延路西侧断续的唐城墙遗址连成一条完整的宽度约 100m,长度超过 5km 的城市带状廊道,这可以有效促进生态系统服务从研究区西南角生态系统服务高值区向建成区中心的流动。最后,加强城市绿色工程技术的运用,如 2018 年实施的道路两侧植树增绿美化工程,通过立体造型、鲜花摆放、花墙建设等,屋顶绿化和建筑外墙藤本绿化等可以在不同尺度与空间下通过提升 UGI 建设增强生态系统服务供给。

参考文献 (References):

- [1] 贺炜,刘滨谊.有关绿色基础设施几个问题的重思.中国园林,2011,27(1):88-92.
- [2] Gill S E, Handley J F, Ennos A R, Pauleit S. Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure. Built Environment, 2007, 33 (1): 115-133.

- [3] 吴伟, 付喜娥. 绿色基础设施概念及其研究进展综述. 国际城市规划, 2009, 24(5): 67-71.
- [4] Benedict M A, McMahon E T. Green infrastructure: smart conservation for the 21st century. Renewable Resources Journal, 2002, 20(3): 12-17.
- [5] Alexander D. Green infrastructure, linking landscapes and communities. Natural Areas Journal, 2017, 27(3): 282-283.
- [6] Weber T, Sloan A, Wolf J. Maryland's Green Infrastructure Assessment: development of a comprehensive approach to land conservation. Landscape and Urban Planning, 2006, 77(1/2): 94-110.
- [7] du Toit M J, Cilliers S S, Dallimer M, Goddard M, Guenat S, Cornelius S F. Urban green infrastructure and ecosystem services in sub-Saharan Africa. Landscape and Urban Planning, 2018, 180: 246-261.
- [8] 栾博, 柴民伟, 王鑫. 绿色基础设施研究进展. 生态学报, 2017, 37(15): 5246-5261.
- [9] Jayasooriya V M, Ng A W M, Muthukumar S, Perera B J C. Green infrastructure practices for improvement of urban air quality. Urban Forestry & Urban Greening, 2017, 21: 34-47.
- [10] Chen W Y. The role of urban green infrastructure in offsetting carbon emissions in 35 major Chinese cities: a nationwide estimate. Cities, 2015, 44: 112-120.
- [11] di Leo N, Escobedo F J, Dubbeling M. The role of urban green infrastructure in mitigating land surface temperature in Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. Environment, Development and Sustainability, 2016, 18(2): 373-392.
- [12] Galagoda R U, Jayasinghe G Y, Halwatura R U, Rupasinghe H T. The impact of urban green infrastructure as a sustainable approach towards tropical micro-climatic changes and human thermal comfort. Urban Forestry & Urban Greening, 2018, 34: 1-9.
- [13] 刘文, 陈卫平, 彭驰. 社区尺度绿色基础设施暴雨径流消减模拟研究. 生态学报, 2016, 36(6): 1686-1697.
- [14] Herzog C P. A multifunctional green infrastructure design to protect and improve native biodiversity in Rio de Janeiro. Landscape and Ecological Engineering, 2016, 12(1): 141-150.
- [15] O'Brien L, de Vreese R, Kern M, Sievänen T, Stojanova B, Atmiş E. Cultural ecosystem benefits of urban and peri-urban green infrastructure across different European countries. Urban Forestry & Urban Greening, 2017, 24: 236-248.
- [16] Russo A, Escobedo F J, Cirella G T, Zerbe S. Edible green infrastructure: an approach and review of provisioning ecosystem services and disservices in urban environments. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 242: 53-66.
- [17] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, Müller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. Ecological Indicators, 2012, 21: 17-29.
- [18] Beichler S A. Exploring the link between supply and demand of cultural ecosystem services - towards an integrated vulnerability assessment. International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management, 2015, 11(3): 250-263.
- [19] Nedkov S, Burkhard B. Flood regulating ecosystem services—Mapping supply and demand, in the Etropole municipality, Bulgaria. Ecological Indicators, 2012, 21: 67-79.
- [20] Schulp C J E, Lautenbach S, Verburg P H. Quantifying and mapping ecosystem services: Demand and supply of pollination in the European Union. Ecological Indicators, 2014, 36: 131-141.
- [21] Syrbe R U, Grunewald K. Ecosystem service supply and demand-the challenge to balance spatial mismatches. International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management, 2017, 13(2): 148-161.
- [22] 严岩, 朱捷缘, 吴钢, 詹云军. 生态系统服务需求、供给和消费研究进展. 生态学报, 2017, 37(8): 2489-2496.
- [23] 王大尚, 郑华, 欧阳志云. 生态系统服务供给、消费与人类福祉的关系. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1747-1753.
- [24] 白杨, 王敏, 李晖, 黄沈发, Alatalo J M. 生态系统服务供给与需求的理论与管理方法. 生态学报, 2017, 37(17): 5846-5852.
- [25] 王文美, 吴璇, 李洪远. 滨海新区生态系统服务功能供需量化研究. 生态科学, 2013, 32(3): 379-385.
- [26] 彭建, 杨旸, 谢盼, 刘焱序. 基于生态系统服务供需的广东省绿地生态网络建设分区. 生态学报, 2017, 37(13): 4562-4572.
- [27] 顾康康, 杨倩倩, 程帆, 储金龙, 陈晓华. 基于生态系统服务供需关系的安徽省空间分异研究. 生态与农村环境学报, 2018, 34(7): 577-583.
- [28] 石忆邵, 史东辉. 洞庭湖生态经济区生态服务供需平衡研究. 地理研究, 2018, 37(9): 1714-1723.
- [29] 孟士婷, 黄庆旭, 何春阳, 杨双妹玛. 区域碳固持服务供需关系动态分析——以北京为例. 自然资源学报, 2018, 33(7): 1191-1203.
- [30] 韩晔, 周忠学. 西安市绿地景观吸收雾霾生态系统服务测算及空间格局. 地理研究, 2015, 34(7): 1247-1258.
- [31] 王晓娟, 孔繁花, 尹海伟, 徐海龙, 李俊生, 蒲英霞. 高温天气植被蒸腾与遮荫降温效应的变化特征. 生态学报, 2018, 38(12): 4234-4244.
- [32] 韩秀珍, 李三妹, 窦芳丽. 气象卫星遥感地表温度推算近地表气温方法研究. 气象学报, 2012, 70(5): 1107-1118.
- [33] 李梦桃, 周忠学. 西安市城市景观的正负生态系统服务测算及空间格局. 地理学报, 2016, 71(7): 1215-1230.
- [34] 王萌辉, 白中科, 董潇楠. 基于生态系统服务供需的陕西省土地整治空间分区. 中国土地科学, 2018, 32(11): 73-80.
- [35] 马琳, 刘浩, 彭建, 吴健生. 生态系统服务供给和需求研究进展. 地理学报, 2017, 72(7): 1277-1289.