

DOI: 10.20103/j.stxb.202305241093

田慧霞, 覃阳毅, 李祖政, 韩丛海, 丁庆伟, 李芊垚, 任巧慧, 代伟, 秦贺兰, 陈洪菲, 王建超, 程小琴. 北京市生态系统服务演变及其对城市化的多尺度响应. 生态学报, 2025, 45(5): 2209-2224.

Tian H X, Qin Y Y, Li Z Z, Han C H, Ding Q W, Li Q Y, Ren Q H, Dai W, Qin H L, Chen H F, Wang J C, Cheng X Q. Changes of ecosystem services in Beijing and its multi-scale response to urbanization. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(5): 2209-2224.

北京市生态系统服务演变及其对城市化的多尺度响应

田慧霞¹, 覃阳毅², 李祖政³, 韩丛海⁴, 丁庆伟¹, 李芊垚¹, 任巧慧¹, 代伟⁵, 秦贺兰³, 陈洪菲³, 王建超³, 程小琴^{2,*}

1 太原科技大学环境与资源学院, 太原 030000

2 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083

3 北京市园林绿化科学研究所, 北京 100102

4 北京市园林绿化局, 北京 100007

5 密云区园林绿化局, 北京 101599

摘要:近年来,城市化与生态系统服务关系的研究日益受到关注。然而,在不同尺度上两者之间的关系尚不清晰。因此,研究旨在探讨北京市生态系统服务与城市化之间的关系,以及这种关系是否以及在时间和空间尺度上发生变化。研究采用 InVEST 模型量化了水源供给、生境质量和土壤保持服务,利用归一化植被指数 (NDVI) 和 MOD17A3HGF 分别量化了粮食供给和碳储存服务,并选取了国内生产总值、人口密度、城市建设用地面积占比和夜间灯光指数 (NTL) 作为城市化指标。通过热点分析、相关性分析和广义可加模型等方法,分析了生态系统服务与城市化指标 (国内生产总值、人口密度、城市建设用地面积占比和夜间灯光指数) 之间的线性和非线性关系。研究结果表明: (1) 2000—2020 年,北京市生境质量和粮食供给服务呈下降趋势,而水源供给、碳储存和土壤保持服务总体呈增长趋势。同时,国内生产总值、夜间灯光指数和人口密度也呈现显著增长趋势; (2) 水源供给和粮食供给的高值主要分布在平原区,碳储存、生境质量和土壤保持服务呈现相反的空间分布特征。城市化指标的高值主要集中在中部和南部地区。 (3) 在网格尺度上,随着夜间灯光指数、人口密度和国内生产总值的增加,粮食供给和生境质量服务呈先降后增的趋势,而碳储存和水源供给服务则呈先增后减的趋势; 在县域尺度上,随着城市化指标的增加,粮食供给、生境质量、碳储存和土壤保持服务整体呈波动下降的趋势,水源供给则呈波动上升趋势。研究明确了城市化对生态系统服务的影响,并强调了城市化及生态系统服务关系间的尺度效应,为北京市生态系统管理提供了参考。

关键词:城市化; 生态系统服务; InVEST 模型; 北京市; 时空异质性

Changes of ecosystem services in Beijing and its multi-scale response to urbanization

TIAN Huixia¹, QIN Yangyi², LI Zuzheng³, HAN Conghai⁴, DING Qingwei¹, LI Qianyao¹, REN Qiaohui¹, DAI Wei⁵, QIN Helan³, CHEN Hongfei³, WANG Jianchao³, CHENG Xiaoqin^{2,*}

1 College of Environment and Resources, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030000, China

2 School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3 Beijing Institute of Landscape Architecture, Beijing 100102, China

4 Beijing Municipal Forestry and Parks Bureau, Beijing 100007, China

5 Miyun district landscaping Bureau, Beijing 101599, China

Abstract: In recent years, research on the relationship between urbanization and ecosystem services has aroused increasing attention. However, the relationship between the two at different scales remains unclear. Therefore, this study aims to

基金项目: 山西省基础研究计划项目 (20211089); 优秀来晋博士科研项目 (20212070); 山西省高等学校科技创新项目 (2021L316)

收稿日期: 2023-05-24; **网络出版日期:** 2024-11-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cxq_200074@163.com

investigate the relationship between ecosystem services and urbanization in Beijing, as well as whether and how this relationship changes over time and space. The study employs the InVEST model to quantify water supply, habitat quality, and soil conservation, while NDVI and MOD17A3HGF are utilized to quantify food provision and carbon storage, respectively. Additionally, domestic gross product (GDP), population density (*PD*), urban land proportion (ULP), and nighttime light intensity (NTL) are selected as urbanization indicators. Through hotspot analysis, correlation analysis, and generalized additive models, we analyze the linear and nonlinear relationships between ecosystem services and urbanization indicators (GDP, *PD*, ULP, and NTL). The results indicate that: (1) From 2000 to 2020, habitat quality and food provision in Beijing showed a declining trend, while water provision, carbon storage, and soil conservation exhibited an overall increasing trend. Simultaneously, GDP, NTL, and *PD* also displayed significant growth trends; (2) High values of water and food provision are mainly distributed in plain areas, while carbon storage, habitat quality, and soil conservation exhibit contrasting spatial distribution characteristics. High values of urbanization indicators are concentrated in the central and southern regions; (3) At the grid scale, with the increase of NTL, *PD*, and GDP, food provision and habitat quality showed a trend of initial decline followed by an increase, while carbon storage and water provision showed a trend of initial increase followed by a decrease. At the county scale, with the increase of urbanization indicators, food provision, habitat quality, carbon storage, and soil conservation overall exhibited a fluctuating declining trend, while water provision shows a fluctuating increasing trend. This study clarifies the impact of urbanization on ecosystem services and emphasizes the scale effect between urbanization and ecosystem service relationships, providing insights for ecosystem management in Beijing.

Key Words: urbanization; ecosystem services; InVEST model; Beijing; spatiotemporal heterogeneity

城市化是 21 世纪最重要的全球趋势之一。有研究表明,到 2050 年,68%的世界人口将生活在城市地区^[1]。中国的快速城市化引起了国际关注,城市人口从 1980 年占总人口的 19%增加到 2018 年的 59%,已经超过世界平均水平。城市化的快速发展导致城市人口的增加以及自然和半自然土地向建设用地的转化,给自然生态系统带来了巨大压力^[2]。城市化是通过改变生态过程限制了生态系统服务的供给^[3-5],同时使得人们对这些服务的需求也随之提高^[6]。人口密集的城市地区通常远离生态系统服务的供给区,这导致区域生态系统服务的空间供需和失调^[7-9]。因此,研究生态系统服务对城市化的时空响应是确定城市化如何影响人类福祉的一个重要方式。

近年来,国内外学者探究了城市化对生态系统服务的影响,并确定了其为主要驱动因素之一^[5, 9-12]。然而,不同研究中对这一影响的结论并不一致。例如,有研究发现,生态系统服务与城市化呈负相关关系^[10, 13-14],主要原因是在快速城市化过程中,自然和半自然生态系统转变为不透水地表,导致生态系统服务供给急剧减少^[14]。相反,也有研究已表明,在城市化进程中,生态系统服务会增加。例如,Zhou 等^[15]研究发现,1996—2014 年京津冀地区的生态系统服务价值随着快速城市化而增加。此外,有研究指出,城市化与生态系统服务之间可能存在“倒 U 型”的非线性关系^[16],即在城市化早期阶段,生态系统服务增加,但在达到一定阈值后开始下降。可变性的原因主要有两个方面。首先,大规模城乡人口迁移与流动可以减少农村地区对自然生态系统的扰动,促进植被覆盖与生物量增加,进而抵消城市扩张导致的生态系统服务减少^[17]。其次,城市化与生态系统服务的关系依赖于服务的类型。例如,城市化会增加径流,减少水分的拦截、蒸发和渗透,进而增加总产水量^[18]。总之,生态系统服务与城市化之间的关系复杂,因此,有必要探讨特定区域内二者的关系,为区域尺度的城市规划和生态系统管理提供科学依据。

目前,城市化与生态系统服务的关系研究通常在单一的时空尺度上进行分析。例如,欧阳晓等^[19]以 2015 年长株潭城市群为例,解析了城市化与生态系统服务的空间交互作用。然而,单一尺度的分析忽略了生态系统服务在时空尺度上的动态变化,无法全面考虑二者的相互作用,可能导致结果的偏差或误差^[20]。例如,夏楚瑜等^[21]发现,在不同尺度上,生态系统服务间的关系存在不同结果,如碳储存服务与粮食供给服务在县域

尺度上存在协同关系,但在栅格尺度及市域尺度上则呈现权衡关系。这说明某一尺度上的关系无法代表其他尺度上的关系。因此,多尺度定量研究可以最大限度地减少单一尺度分析造成的误差^[21-22]。

北京市作为国家的政治、文化中心,自 20 世纪末以来进入了快速扩张阶段^[23]。随着人口大量涌入和城市建成区不断扩大,空气污染、水污染、地下水枯竭、生物多样性丧失、水土流失严重等生态环境问题日益突出^[24],已成为制约北京市可持续发展的瓶颈。因此,本研究根据联合国《千年生态系统评估报告》、《北京城市总体规划(2004—2020 年)》和相关文献^[25-26],选取北京市五项生态系统服务进行评估,探讨多种生态系统服务和城市化指标在时空尺度上的关系,明确 2000—2020 年间北京市的生态系统服务和城市化水平时空变化特征,揭示二者间的相互关系,为北京市未来的城市规划和可持续发展提供科学依据。

1 研究方法数据来源

1.1 研究区概况

北京市位于华北平原北部(39°26′—41°03′N,115°25′—117°30′E),北靠辽东半岛,南接山东半岛,东临天津,距渤海约 150 km,其余均与河北省毗邻(图 1)。北京市总面积为 16810 km²,地势西北高东南低(-129 m 至 2270 m),平均海拔 43.5 m,山地面积约 10200 km²,平原面积约 6200 km²,分别占总面积的 62% 和 38%^[27-28]。该区属温带半湿润大陆性季风气候,气候特点为冬季寒冷干燥,夏季高温多雨,年平均气温 10—13℃,年均降水量约 600 mm,是华北地区降雨最大的地区之一^[29]。北部和西部地区主要被森林覆盖,而南部和东部地区主要是农田。此外,已开发的土地主要位于中南部地区(图 1)。

2000 年至 2020 年,北京市经历了快速的城市扩张和社会经济发展^[30]。国内生产总值(GDP)从 2000 年的 3277.80 亿人民币(约 450 亿美元)增加到 2020 年的 36102.60 亿人民币(约 5000 亿美元)。在过去的 20 年里,总人口也从 1381.9 万急剧增加到 2189.3 万。近年来,持续的城市化的扩张导致许多生态环境问题的出现^[31-32],如空气污染^[33]、水污染^[34]和资源短缺^[35]。

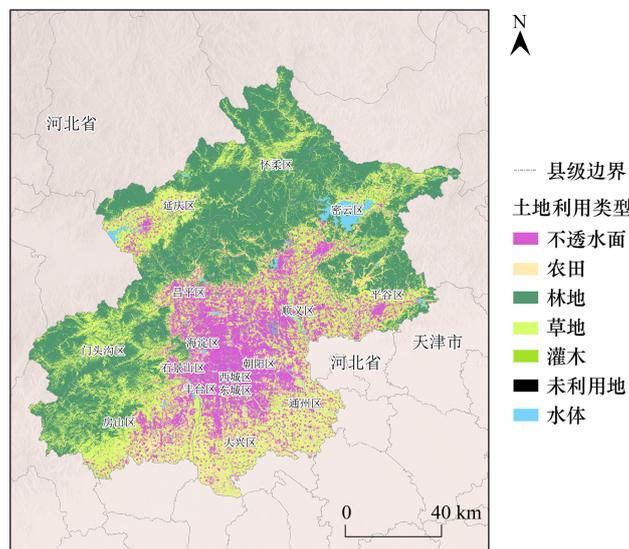


图 1 2020 年北京市区位和土地利用分布图

Fig.1 Location and land use distribution map of Beijing in 2020

1.2 数据来源

本研究根据《土地利用现状分类》(GB/T21010—2017),将北京市土地利用类型划分为林地、耕地、水域、草地、灌木林地、建设用地和未利用地 7 类,所使用的数据的来源和说明见表 1。所有空间栅格数据统一为相同的投影坐标系(WGS_1984_UTM_Zone_51 N)和空间分辨率(30 m×30 m)。

表 1 生态系统服务和城市化指标数据来源

Table 1 Data sources of ecosystem services and urbanization indicators

数据 Data	生态系统服务/ 城市化指标 Ecosystem services/ Urbanization indicators	数据来源 Data sources	数据描述 Data description
土地利用分类和国内生产总值 Land use classification data and GDP data	水源供给、土壤保持、城 市化指标	国家科技基础条件平台—国 家地球系统科学数据中 心 (https://www.geodata.cn/)	栅格大小: 30 m×30 m; 土地利用数据包 括: 林地、耕地、水域、草地、灌木林地、建 设用地和未利用地, 利用其中的建设用地 还可算出该地建设用地面积占比
根系限制层深度 Depth data of root restricted layer	水源供给、土壤保持	国家科技基础条件平台—国家 地球系统科学数据中 心 (https://www.geodata.cn/)	栅格大小: 1000 m×1000 m; 包括: 土壤深 度数据、土壤类型数据、根系数据、降水侵 蚀因子 R 、土壤可蚀性因子 K
净初级生产力 NPP data	碳储存	Terra 卫星 MOD17A3HGF Version 6.0 产品 (https://lpdaac.usgs.gov/products/mod17a3hgf/006/)	栅格大小: 500 m×500 m; 每个栅格单元有 一个净初级生产量值
数字高程模型 DEM data	水源供给	中国科学院资源环境科学数据 中心资源环境数据云平台 (http://www.resdc.cn/)	栅格大小: 30 m×30 m; 每个栅格单元有一 个高程值, 间接描述研究区气候
流域矢量数据 Watershed vector data	水源供给	HydroSHEDS (https://hydrosheds.org/)	矢量格式, 每个流域分配一个编号描述研 究区河流、湖泊等水域的分布情况
社会经济数据 Socio-economic data	粮食供给	2000—2020 北京市区域统计年 鉴 (http://tjj.beijing.gov.cn/)	每个县级行政区域有一个平均值, 包括: 国内生产总值、林业生产总值、农业生产 总值、渔业生产总值
夜间灯光数据 Night light data	城市化指标	由 CHEN 等 ^[36] 制作的一个拓展 的时间序列 (2000—2020) (https://doi.org/10.7910/DVN/YGIVCD)	栅格大小: 1000 m×1000 m; 每个栅格单元 有一个夜间照明数值
人口密度 Population density data	城市化指标	WORLDPOP (https://www.worldpop.org/)	栅格大小: 1000 m×1000 m; 描述研究区城 市化中的人口规模

NPP: 净初级生产力 Net Primary Productivity; DEM: 数字高程模型 Digital elevation model

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务评估

(1) 水源供给

InVEST 模型中的“产水模块”可以根据水量平衡原理, 利用降水量和实际蒸发量来算出区域内可供人类利用以及河流径流的产水量^[37], 公式为:

$$S_{wy} = \left(1 - \frac{AET}{P}\right) \times P \quad (1)$$

$$\frac{AET}{P} = \left(1 + \frac{PET}{P}\right) - \left[1 + \left(\frac{PRT}{P}\right)^\omega\right]^{\frac{1}{\omega}} \quad (2)$$

$$PET = K \times \frac{ET_0}{P} \quad (3)$$

$$\omega = Z \times \frac{AWC}{P} + 1.25 \quad (4)$$

$$AWC = \min(\text{Rest.layer.SoilDepth}, \text{Root.Depth}) \times PAWC \quad (5)$$

式中: S_{wy} 为年产水服务供给量, AET 为年实际蒸散量, P 为年降水量, $\frac{AET}{P}$ 是基于 Xu 等^[38] 和 Zhang 等^[39] 开发的 Budyko 曲线的公式, PET 为栅格单元的潜在蒸散量, ω 是表征自然气候土壤特性的经验参数; ET_0 是潜在蒸散

量, K 是植被蒸散系数; AWC 为植物可用水分含量; Z 是经验常数, 也称为“季节性因子”, 范围为 1 到 30; $PAWC$ 为植物可用水含量(0—1)。

(2) 粮食供给

利用统计年鉴数据计算每个区的农田粮食产量, 随后对归一化植被指数(NDVI)时间序列进行重建, 提取出代表特定时段内植被生长最佳状态的 NDVI 最大值^[40]。更准确地说, 使用多层/多时相 NDVI 栅格地图, 通过以下公式提取每个像素的最大值:

$$NDVI_i = \max_{j=1}^n NDVI_{i,j} \quad (6)$$

在本研究中, 根据每个区的农田内部归一化植被指数, 利用以下公式将粮食供给量从区级空间降尺度到像素级别:

$$G_{ij} = \frac{NDVI_{ij}}{NDVI_{mean,j}} \times G_j$$

式中: i 表示第 j 区农田图层中的第 i 个栅格, G_{ij} 表示第 j 区农田图层中第 i 个栅格分配的粮食产量, G_j 第 j 区农田粮食产量, $NDVI_{ij}$ 表示第 j 区中第 i 个农田栅格的 NDVI, 而 $NDVI_{mean,j}$ 表示第 j 区农田 NDVI 的平均值。该方法主要是通过 ArcGIS 10.5 中的栅格计算器和空间分析工具实现。

(3) 土壤保持

InVEST 模型中的“泥沙输送比例模型”模块可以估算土壤保持量^[41]。其可以根据土壤流失方程计算栅格单元的土壤保持量, 若土壤流失量减少则表明该地的土壤保持服务得到改善, 公式为:

$$SC = RKLS - usle \quad (7)$$

$$usle = R \times K \times LS \times C \times P \quad (8)$$

$$RKLS = R \times K \times LS \quad (9)$$

式中: SC 是年土壤保持量($t \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$), $RKLS$ 是潜在土壤流失量($t \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$), $usle$ 是实际土壤流失量($t \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$); R 是降雨侵蚀力因子($\text{MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$)^[42], K 是土壤侵蚀性因子($t \text{ h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), LS 是长度梯度因子(无单位), C 是坡度因子(无单位), C 和 P 分别代表作物管理和支持实践因子(无单位)^[43]。

(4) 碳储存

植被净初级生产力是指植被在单位时间、面积累积的有机物质总量, 即绿色植物光合作用后产生的有机物质总量减去自身呼吸消耗后的实际积累量。它是反映有机物质生产的一个重要指标, 因此也被广泛用于生态系统服务中对当地碳储存量的评估中^[44]。本文选用 NASA Terra 卫星处理的 MOD17A3HGF Version 6.0 图像, 将其删去填充值后再乘以 0.0001 的比例因子, 得到每个栅格单元所储存的碳量。

(5) 生境质量

生境质量与生物多样性保护关系紧密。在城市化扩张的过程中必然涉及到自然生境土地的变化。InVEST 模型中的“生境质量模块”可计算每类土地利用类型公式为:

$$Q_{xj} = H_j \left(1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \quad (10)$$

式中: H_j 是 j 类土地利用的生境质量, D_{xj}^z 是 x 网格单元中 j 类土地利用类型的总威胁级别, k 是半饱和常数。模型中的“生境质量”值介于 0 到 1 之间。值越高, 生境质量越高。

1.3.2 城市化指标

本研究根据 Zhang 等^[10]所构建的城市化指标体系, 将城市化的过程可以体现在土地扩张、经济发展和人口增长三个方面。本文选取四个城市化指标来量化北京的城市化水平, 分别为国内生产总值(GDP)、人口密度(PD)、城市建设用地面积占比(ULP)和夜间灯光指数(NTL)。其中, 夜间灯光指数用于监测和分析城市地区的结构和社会经济特征^[45], 城市建设用地面积占比用于表示土地城市化, 国内生产总值用于描述经济城市化, 人口密度用于反映人口城市化。公式为:

$$NTL = \frac{NTL_i}{A_i} \quad (11)$$

$$UPL = \frac{A_{urban}}{A_i} \times 100\% \quad (12)$$

$$GDPD = \frac{GDP_i}{A_i} \quad (13)$$

$$POPD = \frac{POP_i}{A_i} \quad (14)$$

式中, NTL 是 i 区的平均夜间光照指数; NTL_i 为 i 区夜间灯光指数之和; UPL 是城市土地的比例; A_{urban} 是城市土地面积; A_i 是研究区的面积; $GDPD$ 和 $POPD$ 分别为 GDP 密度 (元/ km^2) 和人口密度 (人/ km^2); GDP_i 和 POP_i 分别是第 i 区的总 GDP 和总人口。

1.3.3 热点分析

热点分析是一种研究不同时间尺度下空间自相关程度的分析方法, 通过计算 $Getis-Ord G_i^*$ 指数, 可以确定研究范围内的高值或低值要素在空间上发生聚类的位置^[46]。本文利用 ArcGIS10.4 软件研究不同生态系统服务和城市化指标在空间上的聚类情况, 并使用自然断裂分类法, 划分为热点区域、次热点区域、过度区域、次冷点区域和冷点区域共 5 类区域, 公式为:

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_j^n w_{ij}(d) x_j}{\sum_j^n x_j} \quad (15)$$

对 $G_i^*(d)$ 标准化处理得:

$$Z(G_i^*) = \frac{G_i^* - E(G_i^*)}{\sqrt{\text{Var}(G_i^*)}} \quad (16)$$

式中, $E(G_i^*)$ 和 $\sqrt{\text{Var}(G_i^*)}$ 分别是 G_i^* 的数学期望和方差, w_{ij} 是空间权重。若 $Z(G_i^*) > 0$ 且通过显著性检验, 说明与区域 i 相邻地区的观测值相对较高, 区域 i 为高值聚集区 (热点区); 若 $Z(G_i^*) < 0$ 且通过显著性检验, 说明与区域 i 相邻地区的观测值相对较低, 区域 i 为低值聚集区 (冷点区)。 $Z(G_i^*)$ 值越高, 热点聚集越紧密; $Z(G_i^*)$ 值越高, 冷点聚集越紧密^[47]。

1.3.4 统计分析

为量化生态系统服务和城市化指标的时空变化特征, 本研究计算生态系统服务和城市化指标的年平均变化率^[9], 公式为:

$$\text{变化率} = \left\{ \left(\frac{V_j}{V_i} \right)^{\frac{1}{j-i}} - 1 \right\} \times 100\% \quad (17)$$

式中, V_i 和 V_j 是生态系统服务和城市化指标在 i 年份和 j 年份的值。

为检验生态系统与城市化指标之间的线性相关性, 本研究使用 $R_{4.0.3}$ 软件中的 `corrplot` 包计算 Pearson 相关系数。

考虑到不同指标间可能存在其他类型的关系或相关性^[48], 本研究再使用 `mgcv` 包里的广义可加模型分析生态系统服务和城市化指标之间可能的非线性关系。为减少时间尺度的变化对结果造成的影响, 本文将三个时间段内的同一指标进行平均化处理, 再运用广义可加模型进行曲线估计, 以进一步探究生态系统服务和城市化之间的关系。

2 结果与分析

2.1 生态系统服务和城市化的时空演变特征

2.1.1 生态系统服务的时空分布格局和变化特征

2000—2020 年, 北京市生态系统服务具有明显的时空异质性特征 (图 2), 其中, 水源供给和粮食供给服

务的高值主要分布在研究区的中部和东南部区域,碳储存、生境质量和土壤保持服务则呈现出与水源供给服务相反的空间分布特征,在西部和北部山区呈现出较高水平。就生态系统服务的时空变化特征而言,水源供给服务呈先增后减的趋势,在中部和南部有明显增长,在北部减少;生境质量和粮食供给服务不断下降,其中粮食供给在西部和北部的山地呈增加趋势,中部和南部的平原区域呈减少趋势;土壤保持服务的变化并不明显(图 2)。

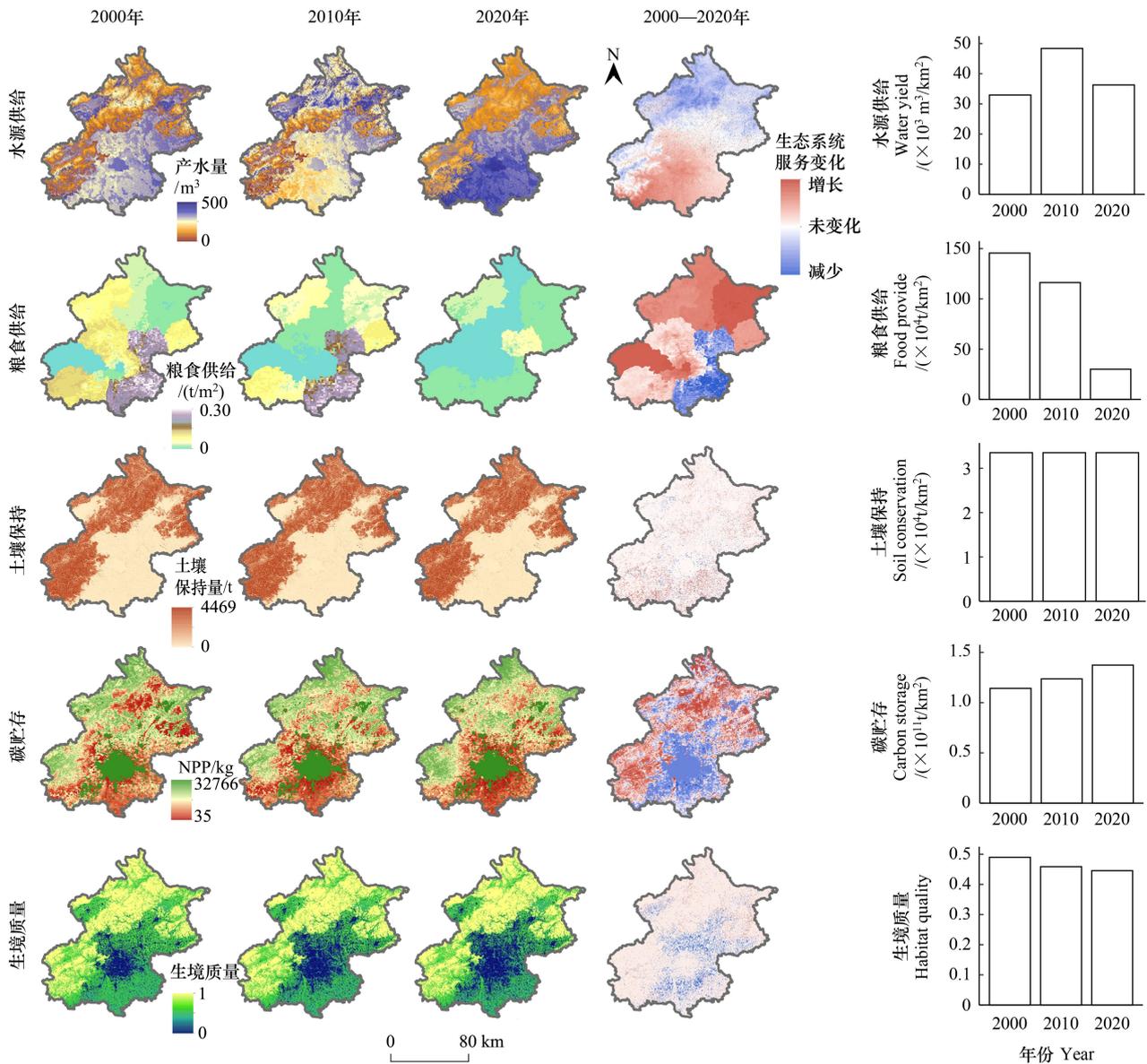


图 2 2000 至 2020 年生态系统服务的空间分布格局和变化

Fig.2 Spatial pattern and changes of ecosystem services from 2000 to 2020

2.1.2 城市化指标的时空分布格局和变化特征

自 2000—2020 年,北京市城市化指标(夜间灯光指数、建设用地面积占比、GDP 和人口密度)表现出明显的时空分异特征(图 3)。其中,城市化指标在空间分布上表现出高度的相似性,夜间灯光指数和建设用地面积占比的增加主要发生在研究区域的中心部分,但有小部分区域呈现下降特征;GDP 和人口密度明显增长的部分主要集中在中部地区,周围区域呈现减少趋势。夜间灯光指数、建设用地面积占比、GDP 和人口密度在 2000—2020 年整体均呈增加趋势,其中,GDP 在 2020 年增加尤为明显。

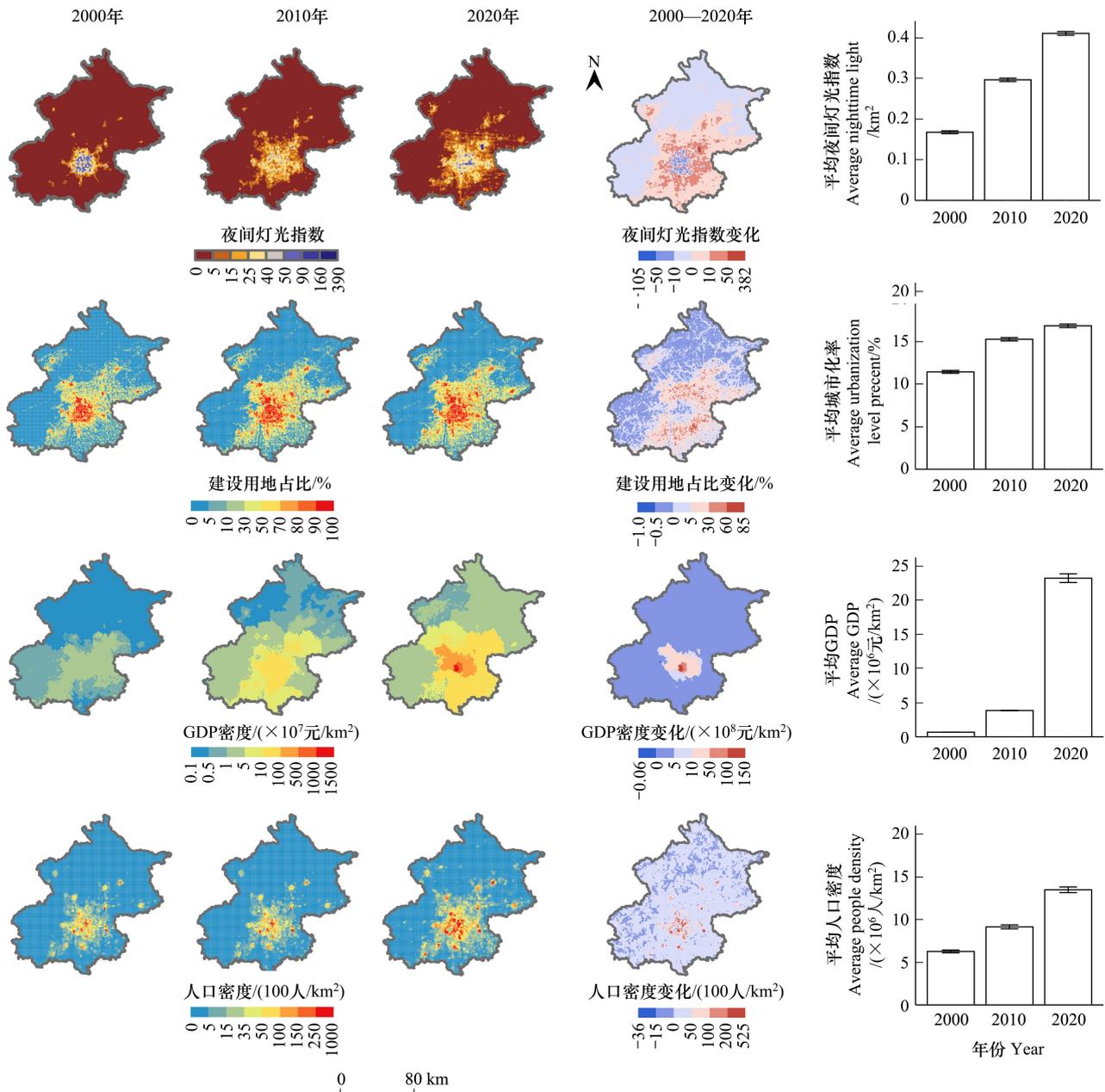


图3 2000至2020年城市化指标的空间分布格局和变化

Fig.3 Spatial pattern and changes of urbanization indicators from 2000 to 2020

2000—2020年,生态系统服务和城市化指标的变化率有较大差异(图4)。其中,GDP、夜间灯光指数和人口密度具有较高的增长率,分别为3335.9%、121.9%和115.2%,GDP增长率的高值主要分布在中心城区,夜间灯光指数增长率的高值主要分布在中心城区的周边。人口密度增长率的高值主要零散分布在北京市内的周边地区。此外,部分生态系统服务呈现下降特征,其中,粮食供给下降79.375%,其次是土壤保持和生境质量,分别下降0.002%和9.0%。这说明20年间北京地区虽然部分生态系统服务供给量有不同程度的增加,但远不能满足城市发展的需求。

2.1.3 生态系统服务和城市化指标的热点区变化特征

总体上看,网格尺度和县域尺度的生态系统服务聚集程度比城市化指标高,其热点和冷点区域面积更大。

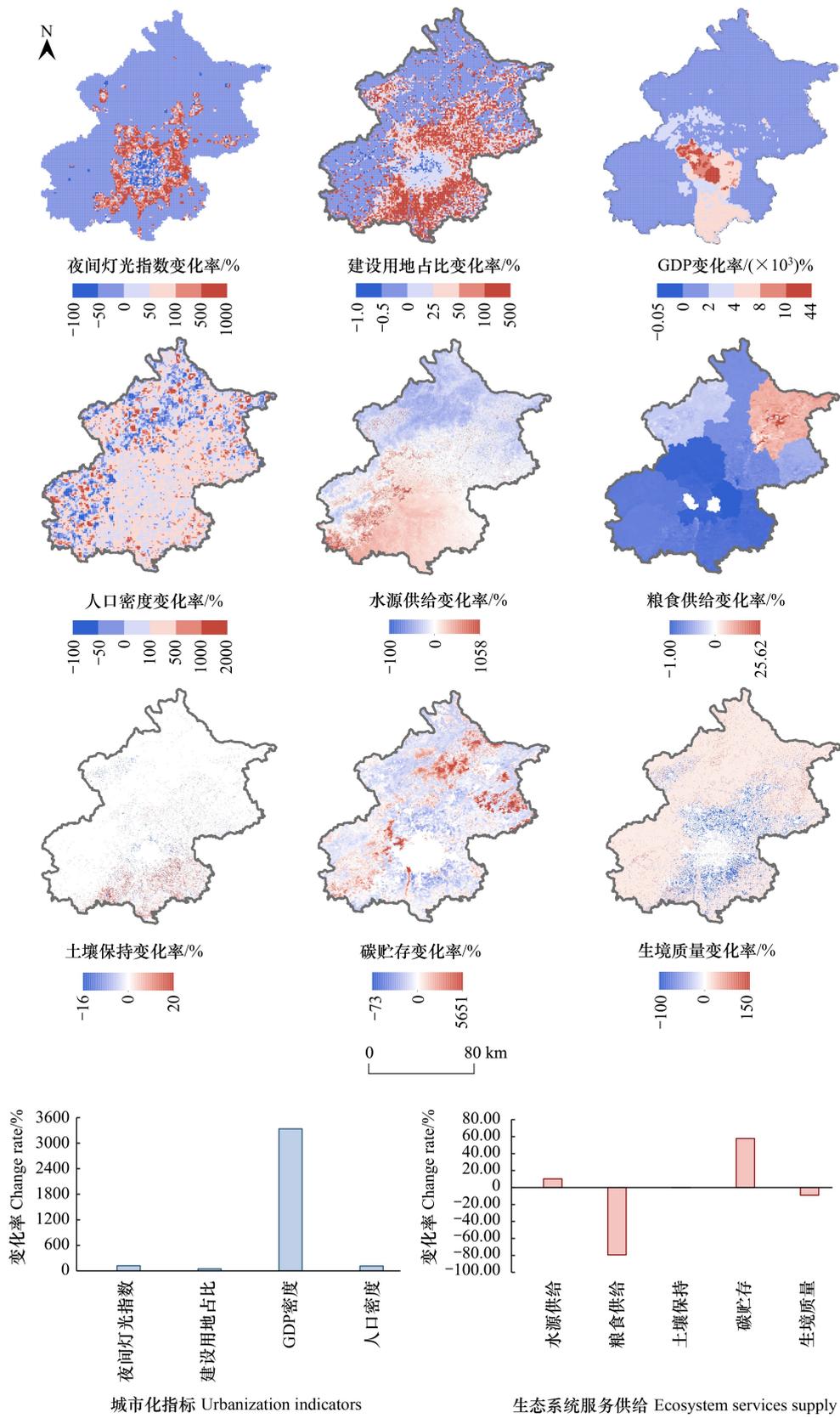


图 4 2000 至 2020 年城市化指标和生态系统服务的变化率

Fig.4 Changing rate of urbanization indicators and ecosystem services from 2000 to 2020

在县域尺度上,除 GDP 有较大面积的热点和冷点区域,其他城市化指标的热点和冷点区域面积均较小(图 5—图 7)。生态系统服务在不同空间尺度上的聚集程度存在差异,在网格尺度上更为显著,除碳储存外,其他生态系统服务的热点和冷点区域占比均超过了 50%。2000—2020 年,水源供给服务在网格尺度的热点和冷点区域占比先减少后增加,粮食供给在网格尺度中的热点和冷点区域占比减少,土壤保持、碳储存、生境质量在两种尺度下的聚集区域占比变化不明显,这表明水源供给和粮食供给服务在空间上的聚集程度容易受到影响而发生显著变化。与网格尺度相比,县域尺度上的城市化指标的热点区域的聚集程度更为明显,仅有建设用地面积占比和 GDP 的热点有少量增加。

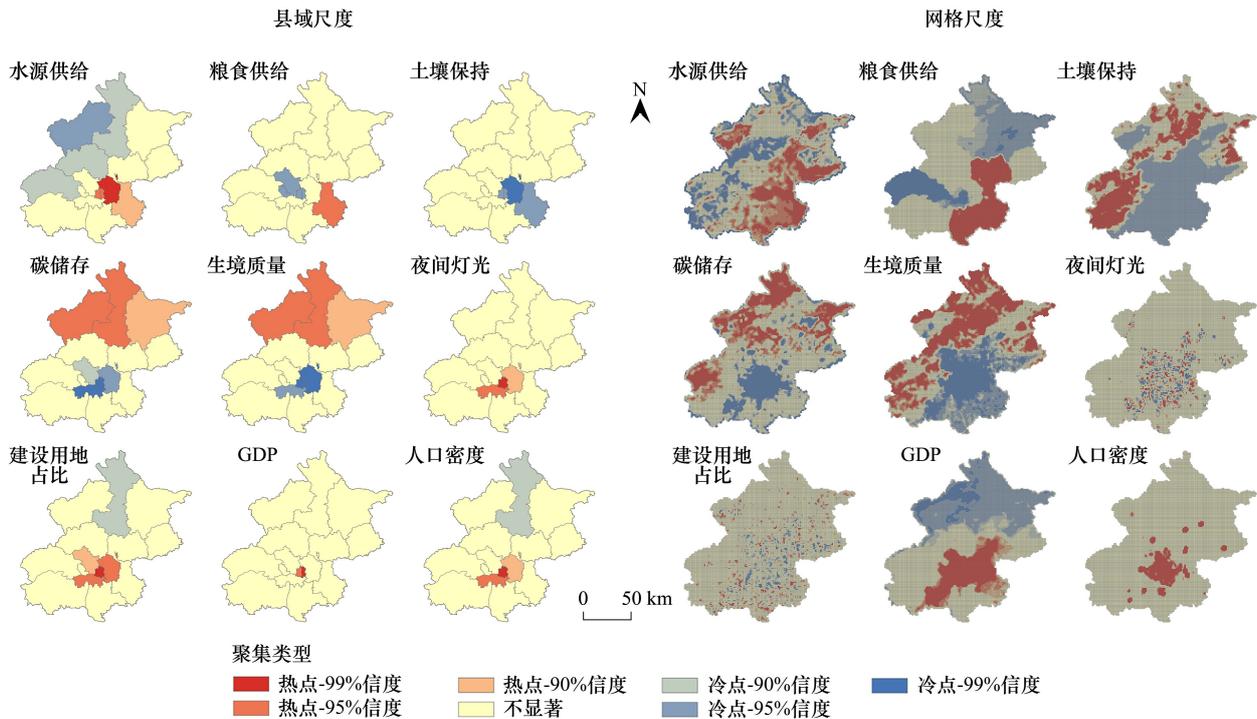


图 5 2000 年城市化指标和生态系统服务在县域和网格尺度的热点分析

Fig.5 Hot spot analysis of urbanization indicators and ecosystem services on county and grid scale in 2000

2.2 生态系统服务对城市化的响应特征

2.2.1 生态系统服务与城市化指标的相关关系

在网格尺度下,水源供给(WY)与夜间灯光指数(NTL)、建设用地占比(ULP)、人口密度(PD)和GDP之间的相关性在各年份均较低(图8)。粮食供给(FP)在各年份与城市化指标的相关性也普遍较低,但在2010年与GDP的相关性显著提升(相关系数为0.33, $P < 0.001$)。土壤保持(SC)与各城市化指标的相关性在各年份均为负值。碳储存(CS)与夜间灯光指数、建设用地占比、人口密度和GDP之间的相关性在各年份均为正值,且显著,特别是与建设用地占比的相关性在各年份均保持较高水平。生境质量(HQ)与城市化指标的相关性在各年份均为负值,且显著,尤其是与建设用地占比的相关性最为显著。在县域尺度下,生态系统服务与城市化指标相关性的绝对值普遍提高(图8)。其中,水源供给在2000年和2020年与所有城市化指标均呈显著正相关。粮食供给和土壤保持服务在各年份与城市化指标的相关性为负值,且显著。碳库存(CS)在各年份与所有城市化指标均呈显著正相关,尤其是在2000年与建设用地占比的相关性最高(相关系数为0.97, $P < 0.001$)。生境质量在各年份与城市化指标的相关性均为负值,且显著,特别是在2020年与建设用地占比的相关性最为显著。

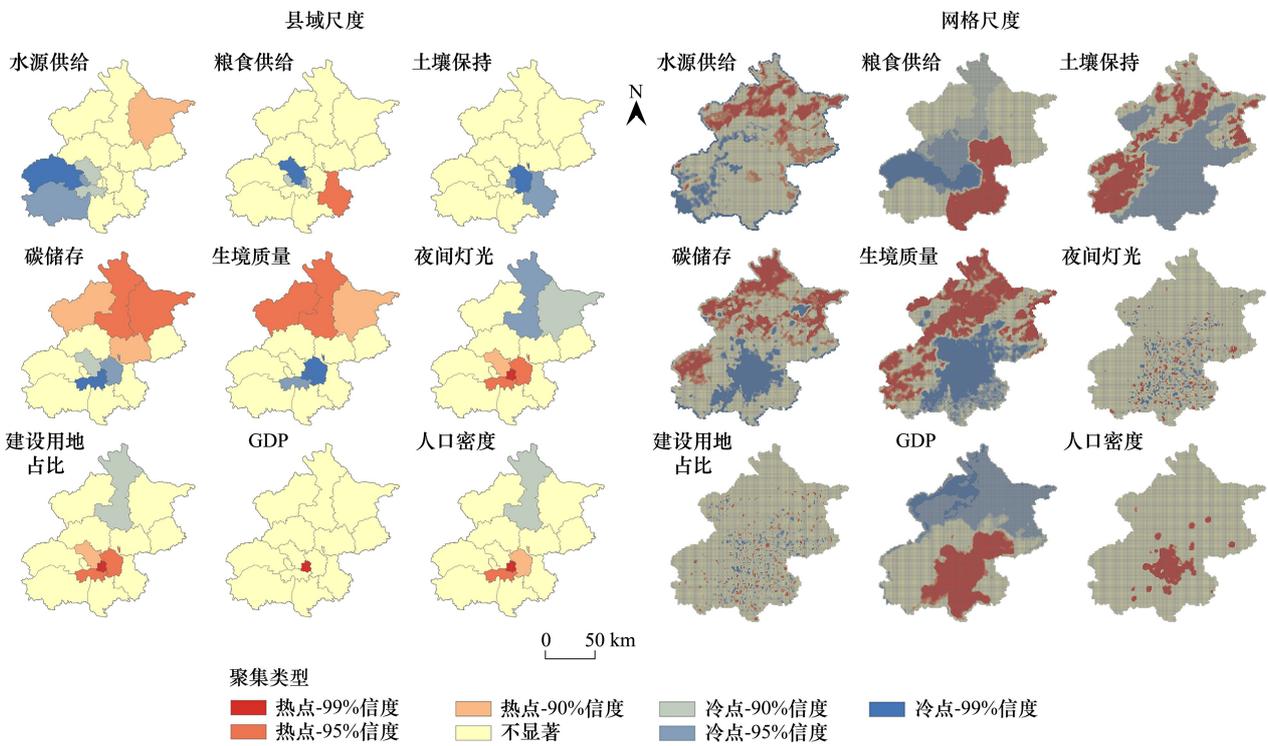


图 6 2010 年城市化指标和生态系统服务在县域和网格尺度的热点分析

Fig.6 Hot spot analysis of urbanization indicators and ecosystem services on county and grid scale in 2010

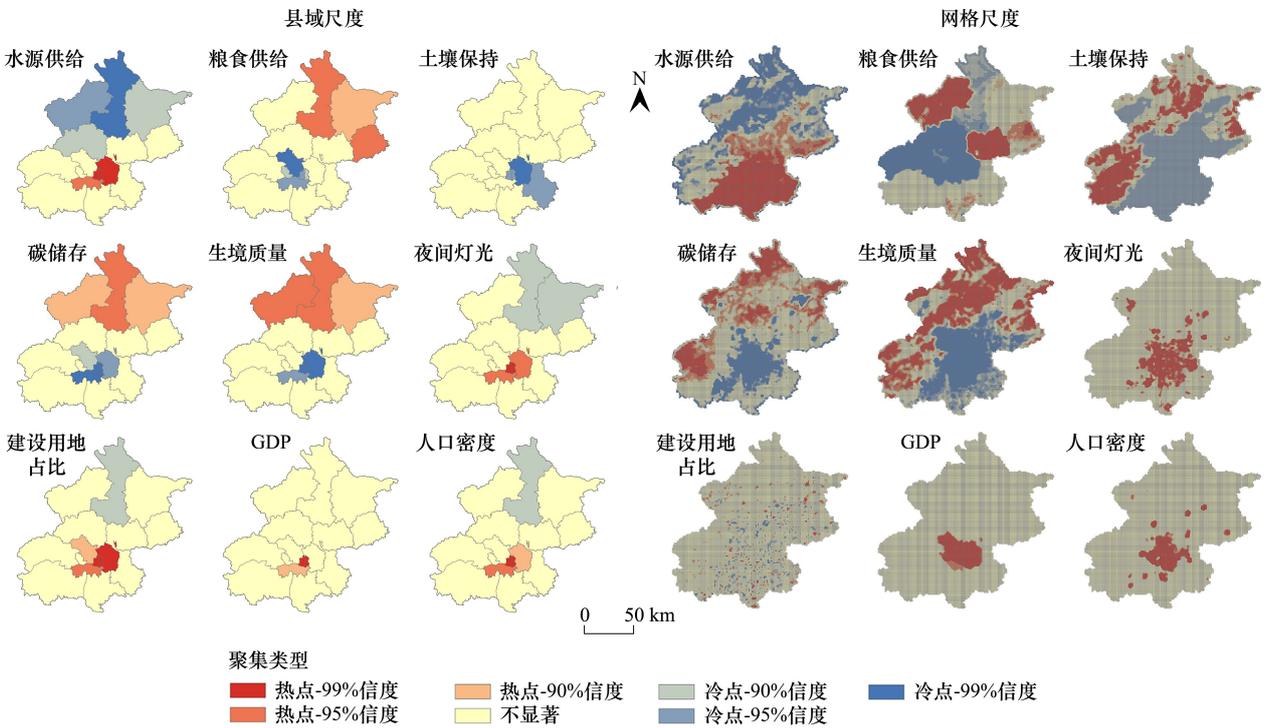


图 7 2020 年城市化指标和生态系统服务在县域和网格尺度的热点分析

Fig.7 Hot spot analysis of urbanization indicators and ecosystem services on county and grid scale in 2020

2.2.2 生态系统服务与城市化指标的非线性关系

在网络尺度下,生态系统服务与城市化指标的相关性普遍较低,尤其是水源供给、粮食供给和土壤保持的

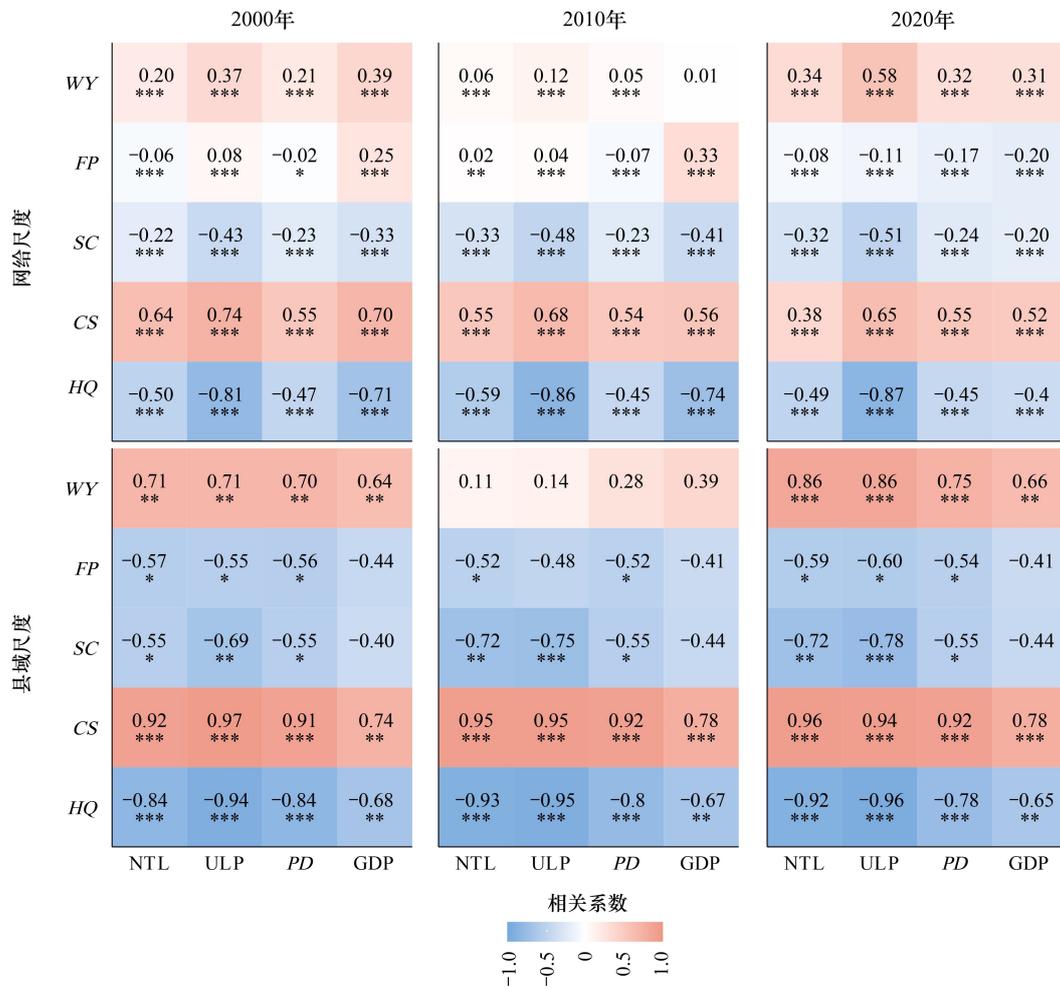


图 8 网格尺度和县域尺度上城市化指标和生态系统服务之间的皮尔逊相关系数

Fig.8 Pearson correlation coefficients between ecosystem services and urbanization indicators on grid and county scale

WY:水源供给;FP:粮食供给;SC:土壤保持;CS:碳储存;HQ:生境质量;NTL:夜间灯光指数;ULP:建设用地占比;PD:人口密度;GDP:国内生产总值;*、**和***分别表示相关系数在0.05、0.01和0.001水平显著

R^2 值较低(多在0.2至0.5之间)。相较之下,碳储存和生境质量与城市化指标的相关性较高(多在0.4至0.8之间)(图9)。在县域尺度下,所有生态系统服务与城市化指标的相关性显著增强,大部分 R^2 值均在0.7以上,特别是碳储存和生境质量与城市化指标的拟合曲线 R^2 均超过0.9。这些结果表明,碳储存和生境质量服务与城市化指标之间存在高度相关性。生态系统服务与城市化指标的相关性在县域尺度更为显著,可能是由于县域尺度能够更好地捕捉到局部生态系统服务与城市化因素的相互影响。此外,在县域尺度上,随着城市化指标的增加,水源供给整体呈增长趋势,碳储存、土壤保持和生境质量服务尽管变化有所波动,但整体呈减少趋势,说明城镇化和经济投资会对水源供给有积极影响,而对碳储存、土壤保持和生境质量服务产生消极影响。粮食供给与城市化指标的关系呈现先增后减的趋势,即在一定范围内,城市化有利于改善粮食供给服务,但当城市化发展到一定程度时,就会减少粮食供给服务。

3 讨论

3.1 生态系统服务的变化特征

近年来,城市化对生态系统服务的影响引起了广泛关注,大量研究探讨了二者间的关系。研究表明,

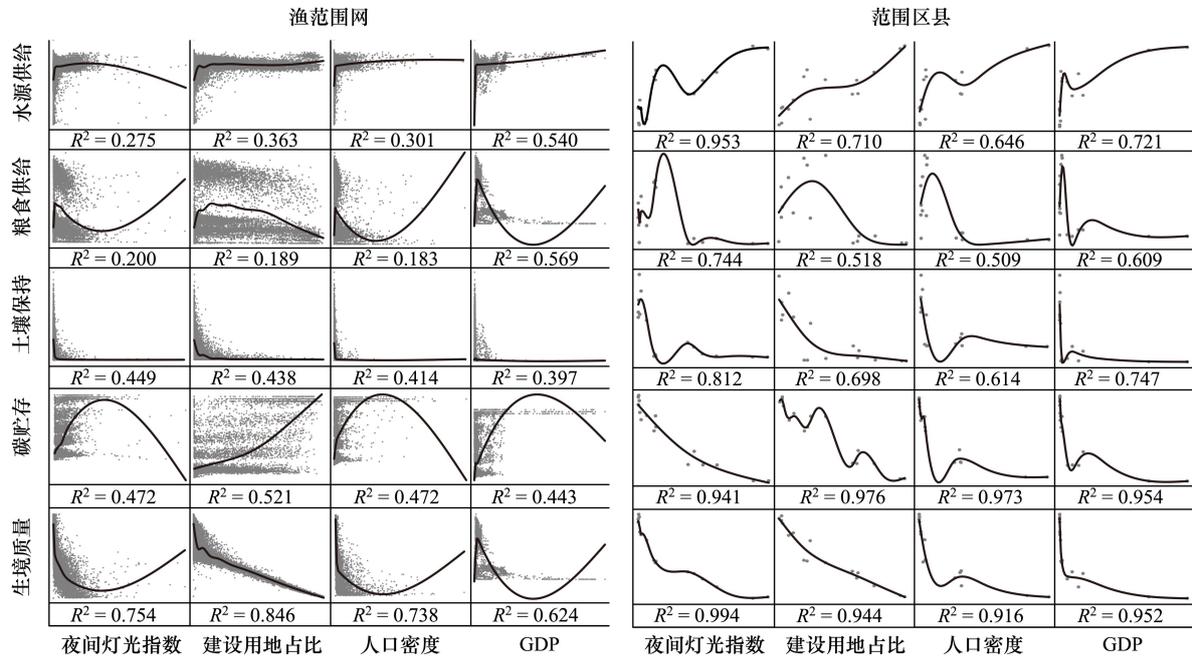


图 9 网格尺度和县域尺度上城市化指标和生态系统服务之间的非线性关系

Fig.9 Nonlinear relationships between ecosystem services and urbanization indicators on grid and county scale

随着城市化进程的推进,生态系统服务呈现出多样化的变化特征^[21]。如有研究发现,随着京津冀地区城市化的快速发展,除碳储存服务呈下降趋势外,产水、粮食供应、土壤保持和生境质量服务总体有所提升^[21]。另一些研究则分析了 2000 年至 2020 年长三角城市群生态系统服务的变化,发现水源涵养和水质净化服务总体呈现向好趋势,土壤保持服务整体呈现倒“N”型增加,而气候调节服务则呈现微弱的下降趋势^[49]。这种差异可能与研究区域的不同以及研究尺度的差异有关。本研究的结果显示,在 2000 年至 2020 年间,随着北京市城市化的快速发展,碳储存服务整体呈现增加趋势,水源供给呈现先增后减的趋势,而生境质量和粮食供给服务则呈现下降趋势,这与其他研究结果存在一致性^[50-51]。北京市 2000—2020 年的碳储存服务增加主要发生在周边的山区,这主要归因于北京市近年来实施的退耕还林政策以及百万亩造林工程对自然生态系统的恢复。而粮食供给服务的减少主要发生在东南部地区,这一方面是由于人类频繁的社会经济活动导致建设用地比例不断增加所致,另外,近些年北京市大力开展的退耕还林过程也是耕地面积减少的重要原因。

3.2 生态系统服务与城市化之间的关系

为了进一步分析城市化对生态系统服务的影响,本研究确定了 2000—2020 年间城市化指标的变化以及与生态系统服务的关系。本研究结果显示,碳储存服务与城市建设用地占比在网格尺度上呈现正相关,与夜间灯光指数、人口密度和国内生产总值呈现倒“U”型的关系,这与多项研究相一致^[16,52]。说明在北京市城市化的初期,城市化水平的提高会促进生态系统服务的增加,而在城市化水平达到一定的阈值后,社会经济活动会降低碳储存服务^[17]。在县域尺度上,线性分析结果显示,随着城市化水平的提高,碳储存服务呈波动下降趋势,这一结果与网格尺度上的关系并不一致,说明多尺度研究的必要性。自 2000 年至 2020 年间,北京市多个区实施退耕还林工程、百万亩造林工程等,进一步提升了植被覆盖度和固碳服务能力,这可以揭示生态系统服务与城市化的曲线关系。

本研究结果发现,粮食供给和生境质量服务与城市化指标中的夜间灯光指数、人口密度和国内生产总值呈现“U”型的关系,且与城市建设用地占比呈负相关关系,这一方面表明快速的城市化和人口数量的增长加剧了生境破碎化的过程^[53-55],另一方面,山区自然生态系统更为脆弱,随着城市化水平的提高,其生境质量必然急剧下降,而山区的农田较少,因此下降没有那么剧烈。到了一定阈值,城市化水平的提高,在北京市平原

区域,城市化指标对生境质量的影响没有那么剧烈,但对粮食供给服务的影响更为剧烈,主要是由于东南部的分布有大量的农田生态系统。此外,粮食供给在城市化水平较高的区域有所增加,这可以解释为农业技术的发展和单位耕地生产力的提高导致了粮食产量的增加。相比之下,城市用地的扩张在网格尺度和县域尺度都会促进水源供给量的增加,这主要是由于水源供给是年降水量、蒸散和地下水补给后剩余的水量,不透水面会减少水的拦截、蒸散和渗透,因此,城市土地扩张通常会导致整体水源供给量的增加^[56]。然而,无论水质如何,水源供给量的增加仅表明供水和雨水收集的水量增加。一些研究表明,产水量的增加也可能产生负面影响,如洪水风险的增加^[57]。

3.3 政策建议

本研究探讨了生态系统服务和城市化指标在网格和县域尺度上的关系。在本研究中,用于表征城市化水平的夜间灯光指数、建设用地面积占比、GDP 和人口密度属于不同的尺度,但它们与生态系统服务的多尺度关系表现出非一致性,表明在城市化与生态系统服务的关系研究中,县域尺度也是一个必须要考虑的研究尺度,可以更为准确的制定科学政策。鉴于北京市不同区域的生态系统服务表现出显著的空间差异,即西北山区较中部城区具有较高的土壤保持、碳储存和生境质量服务,因此,北京市的不同区域应采取不同的生态保护策略,用尽可能少的土地维持城市的生态系统服务,同时为城市发展提供充足的建设用地^[20],如在城区内优化城市绿地系统,提高城市空气质量和景观美观度;在近郊区域内采用生态农业和生态林业等方式,提高水源供给、粮食供给和碳储存服务,以促进城市可持续发展。

3.4 局限性和未来研究方向

鉴于研究区的范围,本研究以 1 km×1 km 网格单位评估生态系统服务,因此,本研究所使用的所有栅格数据均具有 1 km 或更高的分辨率。土地利用数据作为 InVEST 模型最重要的输入数据,其选择与生态系统服务评估结果的分辨率和准确性密切相关。土地利用数据集来源于国家地球系统科学数据中心,总体精度在 90%以上,已应用于多个研究领域。同样,为了确保数据集的准确性,本研究选取来自北京市统计年鉴的社会经济数据集来评估城市化指标,该年鉴提供该区域最准确的统计数据。本文也具有一定的局限性,需要在未来的研究中进一步完善;在分析生态系统服务与城市化的关系时,本研究使用了皮尔逊相关分析,该方法是探讨两个变量线性相关程度的有效方法,描述了两个变量之间的简单关系,但由于没有考虑其他变量的影响,因此,曲线估计被用来进一步探讨变量之间的非线性关系。然而,这两种方法并不能完全说明因果关系,未来应使用结构方程模型、网络分析等方法进一步研究^[58]。

4 结论

城市化进程的加快极大地改变了城市中自然生态系统供给服务的能力。本研究选择以 2000—2020 年 20 年的长时间跨度,探讨了生态系统服务对城市化的响应关系,揭示城市化在不同时空尺度对生态系统服务的影响程度与作用机制。结果表明:(1)2000—2020 年,水源供给和碳储存服务呈整体增长趋势,粮食供给和生境质量整体下降明显,城市化指标均呈增长趋势。(2)生态系统服务呈现明显的空间分异特征,水源供给和粮食供给服务的高值主要分布在平原区,碳储存、生境质量和土壤保持服务呈现相反的空间分布特征。城市化指标的空间分布相似,高值主要集中在中部和南部地区。(3)在网格尺度上,随着夜间灯光指数、人口密度和国内生产总值 GDP 的增加,粮食供给和生境质量服务呈先降后增的趋势,碳储存和水源供给服务呈先增后减的趋势;在县域尺度上,随着城市化指标的增加,粮食供给、生境质量、碳储存和土壤保持服务整体呈波动下降的趋势,水源供给则成波动上升趋势。本研究最后根据研究结果提出了相应的优化策略,为研究区域实现生态系统可持续管控提供有价值的政策指引。

参考文献(References):

- [1] Kundu D, Pandey A K. World urbanisation: trends and patterns. Kundu D, Sietchiping R, Kinyanjui M. Developing National Urban Policies. Singapore: Springer, 2020: 13-49.

- [2] Li Z Y, Luan W X, Zhang Z C, Su M. Relationship between urban construction land expansion and population/economic growth in Liaoning Province, China. *Land Use Policy*, 2020, 99: 105022.
- [3] Li J H, Xie B G, Dong H M, Zhou K C, Zhang X M. The impact of urbanization on ecosystem services: both time and space are important to identify driving forces. *Journal of Environmental Management*, 2023, 347: 119161.
- [4] Yang Y Y, Zheng H, Kong L Q, Huang B B, Xu W H, Ouyang Z Y. Mapping ecosystem services bundles to detect high- and low-value ecosystem services areas for land use management. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 225: 11-17.
- [5] Wang S, Hu M M, Wang Y F, Xia B C. Dynamics of ecosystem services in response to urbanization across temporal and spatial scales in a mega metropolitan area. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 77: 103561.
- [6] Yu L, Lyu Y C, Chen C, Choguill C L. Environmental deterioration in rapid urbanisation: evidence from assessment of ecosystem service value in Wujiang, Suzhou. *Environment, Development and Sustainability*, 2021, 23(1): 331-349.
- [7] Yang Y, Yang H, Cheng Y. Why is it crucial to evaluate the fairness of natural capital consumption in urban agglomerations in terms of ecosystem services and economic contribution? *Sustainable Cities and Society*, 2021, 65: 102644.
- [8] Bagstad K J, Johnson G W, Voigt B, Villa F. Spatial dynamics of ecosystem service flows: a comprehensive approach to quantifying actual services. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 117-125.
- [9] Wang Y, Fu Q, Guo J, Wang T, Chen J. Unveiling the dynamics of urbanization and ecosystem services: insights from the Su-Xi-Chang Region, China. *npj Urban Sustainability*, 2024, 4: 36.
- [10] Zhang Z M, Peng J, Xu Z H, Wang X Y, Meersmans J. Ecosystem services supply and demand response to urbanization: a case study of the Pearl River Delta, China. *Ecosystem Services*, 2021, 49: 101274.
- [11] Xu Z H, Peng J, Qiu S J, Liu Y X, Dong J Q, Zhang H B. Responses of spatial relationships between ecosystem services and the Sustainable Development Goals to urbanization. *The Science of the Total Environment*, 2022, 850: 157868.
- [12] Peng J, Wang X Y, Liu Y X, Zhao Y, Xu Z H, Zhao M Y, Qiu S J, Wu J S. Urbanization impact on the supply-demand budget of ecosystem services: Decoupling analysis. *Ecosystem Services*, 2020, 44: 101139.
- [13] Simkin R D, Seto K C, McDonald R I, Jetz W. Biodiversity impacts and conservation implications of urban land expansion projected to 2050. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(12): e2117297119.
- [14] Sharma S, Nahid S, Sharma M, Sannigrahi S, Anees M M, Sharma R, Shekhar R, Basu A S, Pilla F, Basu B, Joshi P K. A long-term and comprehensive assessment of urbanization-induced impacts on ecosystem services in the capital city of India. *City and Environment Interactions*, 2020, 7: 100047.
- [15] Zhou D Y, Tian Y Y, Jiang G H. Spatio-temporal investigation of the interactive relationship between urbanization and ecosystem services: case study of the Jingjinji urban agglomeration, China. *Ecological Indicators*, 2018, 95: 152-164.
- [16] Wang J L, Zhou W Q, Pickett S T A, Yu W J, Li W F. A multiscale analysis of urbanization effects on ecosystem services supply in an urban megaregion. *The Science of the Total Environment*, 2019, 662: 824-833.
- [17] Zhang X X, Brandt M, Tong X W, Ciais P, Yue Y M, Xiao X M, Zhang W M, Wang K L, Fensholt R. A large but transient carbon sink from urbanization and rural depopulation in China. *Nature Sustainability*, 2022, 5: 321-328.
- [18] Li C, Sun G, Caldwell P V, Cohen E, Fang Y, Zhang Y, Oudin, L, Sanchez G M, Meentemeyer R K. Impacts of urbanization on watershed water balances across the conterminous United States. *Water Resources Research*, 2020, 56(7): e2019WR026574.
- [19] 欧阳晓, 朱翔, 贺清云. 城市化与生态系统服务的空间交互关系研究——以长株潭城市群为例. *生态学报*, 2019, 39(20): 7502-7513.
- [20] Zhang Y, Liu Y F, Zhang Y, Liu Y, Zhang G X, Chen Y Y. On the spatial relationship between ecosystem services and urbanization: a case study in Wuhan, China. *The Science of the Total Environment*, 2018, 637/638: 780-790.
- [21] 夏楚瑜, 国焜, 赵晶, 薛飞, 王楚玥, 周珺, 孙彤, 李淞, 张念慈. 京津冀地区生态系统服务对城镇化的多空间尺度动态响应. *生态学报*, 2023, 43(7): 2756-2769.
- [22] Peng J, Tian L, Liu Y X, Zhao M Y, Hu Y N, Wu J S. Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: Thresholds identification. *The Science of the Total Environment*, 2017, 607/608: 706-714.
- [23] 牟风云, 张增祥, 迟耀斌, 刘斌, 周全斌, 王长有, 谭文彬. 基于多源遥感数据的北京市 1973—2005 年间城市建成区的动态监测与驱动力分析. *遥感学报*, 2007, 11(2): 257-268.
- [24] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 乔青. 北京城市扩张的生态底线——基本生态系统服务及其安全格局. *城市规划*, 2010, 34(2): 19-24.
- [25] Costanza R, de Groot R, Braat L, Kubiszewski I, Fioramonti L, Sutton P, Farber S, Grasso M. Twenty years of ecosystem services: how far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services*, 2017, 28: 1-16.
- [26] Yang Q, Liu G Y, Casazza M, Campbell E T, Giannetti B F, Brown M T. Development of a new framework for non-monetary accounting on ecosystem services valuation. *Ecosystem Services*, 2018, 34: 37-54.
- [27] Zhang B, Li W H, Xie G D, Xiao Y. Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value. *Ecological Economics*, 2010, 69(7): 1416-1426.
- [28] Sheng W P, Zhen L, Xie G D, Xiao Y. Determining eco-compensation standards based on the ecosystem services value of the mountain ecological forests in Beijing, China. *Ecosystem Services*, 2017, 26: 422-430.
- [29] Xie W X, Huang Q X, He C Y, Zhao X. Projecting the impacts of urban expansion on simultaneous losses of ecosystem services: a case study in Beijing, China. *Ecological Indicators*, 2018, 84: 183-193.
- [30] Sun R H, Li F, Chen L D. A demand index for recreational ecosystem services associated with urban parks in Beijing, China. *Journal of*

- Environmental Management, 2019, 251: 109612.
- [31] 张雪松, 王云冬. 中部快速城市化地区城市扩张与生态景观时空异质性分析——以武汉市为例. 长江流域资源与环境, 2023, 32(08): 1583-1593.
- [32] 凌云, 杨宜男, 许迦龙, 王立, 王子豪, 孙艺妍, 姚晨心, 王原. 京津冀地区城市化对典型生态系统服务供需关系的影响. 生态学报, 2023, 43(13): 5289-5304.
- [33] Liu Q Y, Baumgartner J, Zhang Y X, Schauer J J. Source apportionment of Beijing air pollution during a severe winter haze event and associated pro-inflammatory responses in lung epithelial cells. Atmospheric Environment, 2016, 126: 28-35.
- [34] Li F, Zhang S W, Yang J C, Bu K, Wang Q, Tang J M, Chang L P. The effects of population density changes on ecosystem services value: a case study in Western Jilin, China. Ecological Indicators, 2016, 61: 328-337.
- [35] Chen Y Q, Zhao L M. Exploring the relation between the industrial structure and the eco-environment based on an integrated approach: a case study of Beijing, China. Ecological Indicators, 2019, 103: 83-93.
- [36] Chen Z Q, Yu B L, Yang C S, Zhou Y Y, Yao S J, Qian X J, Wang C X, Wu B, Wu J P. An extended time series (2000—2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration. Earth System Science Data, 2021, 13(3): 889-906.
- [37] Li Z Z, Hu, B A, Ren Y F. The supply-demand budgets of ecosystem services response to urbanization: insights from urban-rural gradient and major function-oriented areas. Remote Sensing, 2022, 14, 5670.
- [38] Xu X L, Liu W, Scanlon B R, Zhang L, Pan M. Local and global factors controlling water-energy balances within the Budyko framework. Geophysical Research Letters, 2013, 40(23): 6123-6129.
- [39] Zhang L, Hickel K, Dawes W R, Chiew F H S, Western A W, Briggs P R. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. Water Resources Research, 2004, 40(2): W02502.
- [40] Peng J, Hu X X, Wang X Y, Meersmans J, Liu Y X, Qiu S J. Simulating the impact of Grain-for-Green Programme on ecosystem services trade-offs in Northwestern Yunnan, China. Ecosystem Services, 2019, 39: 100998.
- [41] 周彬, 余新晓, 陈丽华, 张振明, 吕锡芝, 范敏锐. 基于 InVEST 模型的北京山区土壤侵蚀模拟. 水土保持研究, 2010, 17(6): 9-13, 19.
- [42] 章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力. 资源科学, 2003, 25(1): 35-41.
- [43] 李苒. 基于 InVEST 模型的榆林市土壤保持生态效益研究. 干旱区研究, 2015, 32(5): 882-889.
- [44] 何浩, 潘耀忠, 朱文泉, 刘旭拢, 张晴, 朱秀芳. 中国陆地生态系统服务价值测量. 应用生态学报, 2005, 16(6): 1122-1127.
- [45] 陈晋, 卓莉, 史培军, 一之瀨俊明. 基于 DMSP/OLS 数据的中国城市化过程研究——反映区域城市化水平的灯光指数的构建. 遥感学报, 2003, 7(3): 168-175.
- [46] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics. Anselin L, Rey S. Perspectives on Spatial Data Analysis. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010: 127-145.
- [47] 李祖政. 北京市生态系统服务对气候和土地利用的响应及情景模拟[D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
- [48] Chen W X, Chi G Q. Urbanization and ecosystem services: the multi-scale spatial spillover effects and spatial variations. Land Use Policy, 2022, 114: 105964.
- [49] 嵇娟, 陈军飞, 丁童慧, 李远航. 长三角城市群城市洪涝韧性与生态系统服务的耦合协调关系. 生态学报, 2024, 44(7), 2772-2785.
- [50] 杨婉清, 杨鹏, 孙晓, 韩宝龙. 北京市景观格局演变及其对多种生态系统服务的影响. 生态学报, 2022, 42(16): 6487-6498.
- [51] Sun X, Lu Z M, Li F, Crittenden J C. Analyzing spatio-temporal changes and trade-offs to support the supply of multiple ecosystem services in Beijing, China. Ecological Indicators, 2018, 94: 117-129.
- [52] 陈万旭, 刘志玲, 李江风, 冉端, 曾杰. 长江中游城市群生态系统服务和城镇化之间的空间关系研究. 生态学报, 2020, 40(15): 5137-5150.
- [53] 王兆峰, 汤桂林. 长株潭城市群旅游城镇化与生态系统服务价值耦合研究. 中南林业科技大学学报: 社会科学版, 2021, 15(5): 88-97.
- [54] 仇江啸, 王效科, 逯非, 欧阳志云, 郑华. 城市景观破碎化格局与城市化及社会经济发展水平的关系——以北京城区为例. 生态学报, 2012, 32(9): 2659-2669.
- [55] 陈立恒, 龚健, 王雄, 郑欣璐. 长江中游地区生态系统服务平衡与城镇化的空间关系. 生态学报, 2021, 41(14): 5546-5556.
- [56] Delphin S, Escobedo F J, Abd-Elrahman A, Cropper W P. Urbanization as a land use change driver of forest ecosystem services. Land Use Policy, 2016, 54: 188-199.
- [57] Li J H, Zhou K C, Xie B G, Xiao J Y. Impact of landscape pattern change on water-related ecosystem services: comprehensive analysis based on heterogeneity perspective. Ecological Indicators, 2021, 133: 108372.
- [58] Hu B A, Wu H F, Li Z Z, Jing H Y, Zheng Z X, Han H R, Cheng X Q, Kang F F. Aridification weakens ecosystem services by reducing complexity and stability of socio-ecological networks. Journal of Cleaner Production, 2023, 387: 135823.