

DOI: 10.20103/j.stxb.202506051416

刘亦文,熊万灵,邓楠,颜建军.基于改进型遥感生态指数的京津冀地区生态系统服务价值时空演变及其驱动因素研究.生态学报,2026,46(1):

Liu Y W, Xiong W L, Deng N, Yan J J. Analysis of the spatial and temporal evolution and drivers of ecosystem service values in Beijing-Tianjin-Hebei region based on modified remote sensing ecological index. Acta Ecologica Sinica, 2026, 46(1): - .

基于改进型遥感生态指数的京津冀地区生态系统服务价值时空演变及其驱动因素研究

刘亦文¹, 熊万灵², 邓楠³, 颜建军^{4,*}

1 湖南工商大学国际商学院, 长沙 410205

2 湖南工商大学资源环境学院, 长沙 410205

3 南昌大学经济管理学院, 南昌 330031

4 湖南工商大学经济与贸易学院, 长沙 410205

摘要:生态系统服务价值(ESV)的时空变化及其驱动因素的确定是生态系统服务管理和决策的基础。基于 2013、2015、2017、2019、2021 以及 2023 年 6 期土地利用/土地覆盖遥感监测数据,对京津冀地区的遥感生态指数和 ESV 进行计算,并分析其时空演变、损益情况及驱动因素。研究发现:研究期内京津冀地区存在大量耕地向其他土地利用类型转化,其中耕地转不透水面和草原的面积最多;ESV 总体变化呈现出先降低后上升的趋势,ESV 的空间分布呈现出山地高于平原地区,沿海地区高于内陆地区;2013—2023 年京津冀地区 ESV 变化指数总体表现出先减少后增加的态势,尤其是在 2017—2023 年阶段研究区域内部获得增益最多;ESV 的损益情况分析表明,京津冀地区的 ESV 变化呈现出先损失后增益再平稳的态势。相比自然因素,社会经济因素对 ESV 的影响更强,尤其是人均 GDP 在其中发挥了关键驱动作用,而人类活动强度(HAI 值)大体呈现上升态势,北京市、天津市等经济活力较强的地区人类活动强度较高,并且在 2023 年分别达到峰值 0.7466 和 0.6801;交互探测结果表明,各因子对研究区生态系统服务价值作用呈现双因子增强和非线性增强,表明京津冀地区 ESV 不仅受各驱动因子单独作用,同时也会受到驱动因子叠加影响。研究结果为京津冀地区的生态环境与区域经济协调发展提供了参考依据。

关键词:京津冀地区;生态系统服务价值;时空演变;驱动因素

Analysis of the spatial and temporal evolution and drivers of ecosystem service values in Beijing-Tianjin-Hebei region based on modified remote sensing ecological index

LIU Yiwen¹, XIONG Wanling², DENG Nan³, YAN Jianjun^{4,*}

1 International Business School, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China

2 School of Resource and Environment, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China

3 School of Economics & Management, Nanchang University, Nanchang 330031, China

4 School of Economics and Trade, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China

Abstract: The spatio-temporal variations of ecosystem service value (ESV) and the determination of its driving factors are the basis for ecosystem service management and decision-making. Based on the remote sensing monitoring data of land use/land cover in 2013, 2015, 2017, 2019, 2021 and 2023, the remote sensing ecological index and ESV of the Beijing-

基金项目:湖南省自然科学基金面上项目(2025JJ50469,2025JJ30032);长沙市自然科学基金面上项目(kq2402104);国家社会科学基金一般项目(25BJY130)

收稿日期:2025-06-05; 网络出版日期:2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yan751225@163.com

Tianjin-Hebei region were calculated, and their spatio-temporal evolution, profit and loss situation, and driving factors were analyzed. Our findings showed that, during the research periods, a large amount of cultivated land in the Beijing-Tianjin-Hebei region was transformed into other land use types, among which the area of cultivated land with low permeability and grasslands was the largest. The overall change of ESV shows a trend of decrease and then increase. The spatial distribution of ESV showed that it is higher in mountainous areas than in plain areas, and higher in coastal areas than in inland areas. From 2013 to 2023, the ESV change index in the Beijing-Tianjin-Hebei region generally showed a trend of first decreasing and then increasing. The gain was the greatest during the period from 2017 to 2023, . The analysis of the profit and loss situation of ESV showed that the changes in ESV in the Beijing-Tianjin-Hebei region present a trend of first loss, then gain, and finally stabilization. Compared with natural factors, socio-economic factors had a stronger impact on ESV, especially per capita GDP plays a key driving role in it. Meanwhile, the intensity of human activities (HAI value) generally showed an upward trend. Regions with strong economic vitality such as Beijing and Tianjin have a higher intensity of human activities, which reached their peaks of 0.7466 and 0.6801 respectively in 2023. The results of interactive detection showed that the role of each factor in the ecosystem service value of the study area presents a two-factor and nonlinear enhancement, indicating that the ESV in the Beijing-Tianjin-Hebei region is not only affected by the individual action of each driving factor, but also by the compound effects of driving factors. The results provide a basis for coordinating development of the ecological environment and regional economy in the Beijing-Tianjin-Hebei region.

Key Words: Beijing-Tianjin-Hebei region; ecosystem service value; spatial and temporal evolution; driving factors

生态系统服务是连接自然环境与人类福祉的桥梁,是人类赖以生存和可持续发展的物质基础,具有重要的生态和社会经济价值。而土地利用/土地覆盖 (LULC) 作为人类活动的主要表现形式,对生态系统服务功能的供给能力和空间配置产生深刻影响^[1-3]。从直接影响的角度来看,土地使用类型的转换和空间格局的重组大大改变了生态系统服务的提供,例如,城市扩张和农业发展侵蚀了自然生态系统,削弱了土壤保持和水净化等关键功能,同时加剧了生态系统服务之间的权衡,最终导致生态系统退化。土地利用的变化加剧了生境的破碎化,破坏了景观的连通性,从而削弱了生态系统的稳定性,并对人类福祉产生了不利影响^[4-5]。生态系统服务是土地利用在特定时空尺度下的产出,而土地利用类型决定了地表覆被类型与空间格局,能够直接控制生态系统结构,对生态系统服务具有显著影响^[6],并且土地利用类型的变化能够导致调节、供给和文化等方面的生态系统服务价值发生改变^[7],因此,生态系统服务(ES)、土地利用(LULC)和生态系统服务价值(ESV)三者之间可以概括为“供给—改变—度量”的因果链关系。作为贯彻落实习近平生态文明思想和“绿水青山就是金山银山”理论的基础性研究之一,生态系统服务价值核算已成为支撑我国生态文明体制改革的前沿领域和重要基础。随着生态文明建设的不断推进,ESV 研究正成为生态学和经济学相关领域的研究前沿和热点之一。因此,科学准确地评估 ESV,将为决策者制定更为系统合理的生态环境可持续利用与发展战略、优化生态系统服务功能、加强区域生态安全管理、提高人类福祉提供参考依据^[8-9]。

生态系统服务这一概念最早由 King^[10] 和 Helliwell^[11] 使用,Ehrlich 和 Ehrlich 基于前人研究自然功能的社会价值,将生态系统服务概念化^[12],是提供人类福祉和维持生物多样性的重要工具^[13],是了解生态系统与社会需求联系的有效途径,被视为协调生态系统与社会需求发展的关键^[14]。自 Costanza 等^[15] 为生态系统服务研究提供了新的思路和方法后,学者们对生态系统服务的不同内容进行了研究,如生态系统为可持续人类福祉提供的支持、支持人类生命的各种条件和过程或强调生态系统提供的不同类型服务^[16-20]。生态系统服务的价值评估是生态环境保护、生态功能区划、环境经济核算和生态补偿决策的重要依据和基础,而根据现有研究可将生态系统服务分为供给服务、调节服务、支持服务以及文化服务四大类^[21-23],这四类服务功能的划分则为生态系统服务价值的度量提供了一定的基础。

ESV 在时间和空间尺度上具有多种潜在用途,如提高认识、政策选择以及情景分析等^[24]。ESV 评估对象

涉及范围广泛,包括林地^[25-26]、湿地^[27]、草地^[28]、水域^[29]以及海洋^[30]等各种生态要素,评估方法大体可分为价值量评估法^[31]和物质量评估法^[32],而相较于价值量评估法,物质量评估的可信度更高,同时在空间可视化方面也优于前者^[33]。传统 ESV 评估方法主要存在两大局限,一是主要依赖统计年鉴或土地利用数据,其价值当量权重多基于专家经验确定,具有较强的主观性,这可能导致对区域差异的忽视,且难以体现生态系统服务在时间和空间上的动态变化;二是有学者指出传统 ESV 评估方法在评估过程中可能存在重复计算问题^[34]。基于此,在潘耀忠等^[35]提出的一种基于遥感定量测量的 ESV 评估模型基础之上,魏之首等^[36]则提出了以改进型遥感生态指数为时空动态调节因子的 ESV 评估方法,更全面且客观地呈现区域生态系统结构、功能及过程的时空差异,从而精准地对生态系统服务的时空动态价值进行评估。国内现有文献多从国家、生态系统、流域乃至战略区域等不同层面测算 ESV 总量,如谢高地等学者测算得到中国生态系统每年提供约 38.1 万亿元的服务价值总量,其中,森林生态系统以 46.0% 的占比居首。从服务类型来看,调节功能占主导地位,占比达 71.3%;支持服务、供给服务及文化服务分别占 19.0%、5.9% 和 3.8%^[37];何浩等学者利用遥感技术,结合生态学方法计算出 2000 年中国陆地生态系统提供的 ESV 为 9.17 万亿元,其空间格局总体呈“东高西低、中部向东北及南部抬升”之势,与植被的地带性梯度高度吻合^[38];严长安等学者基于 ESV 核算体系,测算得出 2010 年和 2016 年滇池流域 ESV 分别为 688.16 亿元和 729.31 亿元^[39];颜建军等学者通过单位面积生态系统价值当量因子的方法测算出 2023 年京津冀重大战略区域 ESV 为 5412.75 亿元^[40];国外学者则多关注于 ESV 变化的影响因素,Estoque 等学者发现缅甸红树林因森林砍伐导致 ESV 下降^[41],Estoque 等学者还发现菲律宾夏季首都比格在过去 21 年(1988—2009)快速城市化的过程中,空间和社会经济成分是导致该地区自然景观及 ESV 发生巨大变化的主要因素^[42],Sujit 等学者通过研究发现 LULC 变化导致的快速城市增长可能会导致生态系统服务(ES)的碎片化和退化,进而造成 ESV 损失^[43]。

自改革开放以来,人类活动强度大幅提高^[44],城市化进程持续推进,随之而来的生态环境问题也日渐凸显,如水土流失、气候恶化以及生物多样性降低等,不仅阻碍了城市的可持续发展,同时也对居民健康造成了极大的威胁^[45]。京津冀地区作为中国经济发展较为迅速的三大城市群之一,城市化所导致的生态保护与社会经济发展的关系问题逐渐加深。早年相关研究表明,1988—2008 年京津冀地区的城市扩张导致生态系统服务功能严重退化,生态环境安全面临严峻挑战^[46]。近年来,刘菁华等通过研究发现京津冀城市群不均衡的区域扩展模式不仅会进一步加剧不同地区间城市化水平的差距,还会提高区域重要生态系统服务功能的潜在胁迫影响^[47];任胤铭等学者借助未来土地利用模拟(FLUS)模型模拟京津冀地区 2045 年土地利用空间分布格局,发现在自然发展情景下,城镇用地的扩张引发了大量的碳储量和生境质量损失,耕地保护情景下,水质净化能力出现最大程度的下降,未来京津冀地区的生态系统服务功能将面临严峻挑战^[48]。如何应对日益严峻的生态环境挑战是京津冀地区高质量发展的突出问题。

目前针对京津冀地区生态系统的研究主要涉及土地利用^[49]、湿地服务功能、生态补偿机制^[50-51]等方面,对该区域内生态系统服务价值变化特征及其影响机制的研究相对较少。基于此,本研究以 2013、2015、2017、2019、2021 以及 2023 年 6 期土地利用/土地覆被遥感监测数据为基础对京津冀地区生态系统服务价值进行评估,并对其空间演变、损益情况及驱动因素进行深入探讨,为京津冀地区土地利用决策提供信息,为地区政府生态环境保护工作提供参考依据。

1 研究设计

1.1 研究区概况

京津冀地区(北纬 36°03'—42°40',东经 113°27'—119°50')由北京市、天津市和河北省内的保定、唐山、廊坊、秦皇岛、张家口、承德、石家庄、沧州、邯郸、邢台、衡水 11 个地级市组成,总面积约为 21.6 万 km²(图 1)。该区域地形是西北向东南倾斜,地貌多样,气候属温带、半湿润至半干旱季风气候;季节变化明显,春季和秋季干燥多风,夏季炎热多雨,这种多样的自然条件为该地区的经济发展和人口集中提供了有力的支持。

近年来,北京、天津等地城市化进程加快,人口和产业高度集中,截止到 2024 年,京津冀地区常住人口约为 10925.2 万人,占全国总人口的 7.76%,区域经济总量达 11.5 万亿元,占全国 GDP 的 8.52%。该地区在中国政治、经济和文化格局中具有举足轻重的地位,也是国家生态安全的组成部分。但快速的城市扩张和高强度的经济活动带来了生态破碎化和生态系统服务功能退化等挑战。因此,识别和分析京津冀地区土地利用变化的关键驱动因素,对深入理解该地区生态系统服务功能演变机制,增强生态治理现代化能力,优化土地资源配置至关重要。

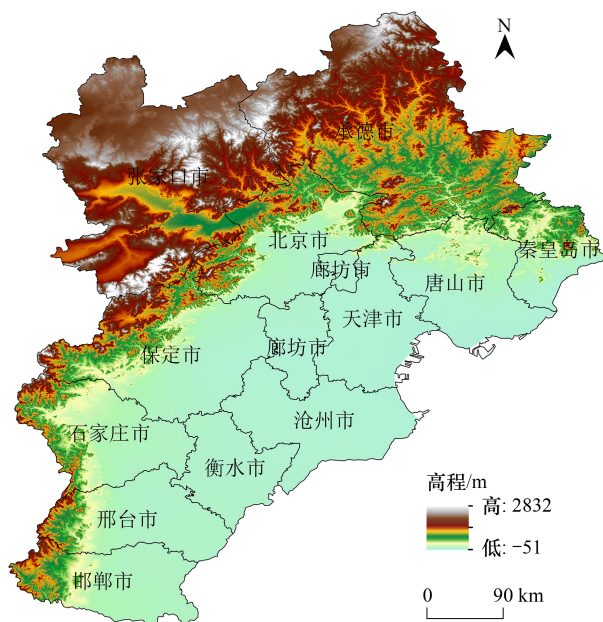


图 1 区位概况图

Fig.1 Location overview map

1.2 数据来源

研究中的数据包括 2013 年、2015 年、2017 年、2019 年、2021 年以及 2023 年 6 期土地利用/土地覆被遥感监测数据 (<http://www.resdc.cn>), 该数据基于 LandsatMSS、TM/ETM 和 Landsat8 卫星遥感数据, 采用人机交互解译获得, 空间分辨率为 $1000\text{m} \times 1000\text{m}$ ^[52], 根据研究需求, 将土地利用数据重分类为耕地、林地、灌木、草原、水域、冰雪、裸地、不透水面、湿地 9 个一级分类。粮食单产数据来源于 2013—2023 年北京市、天津市以及河北省统计年鉴, 粮食价格来源于《中国农产品价格调查年鉴》。遥感指标来源于 Google Earth Engine 平台, 调取 NASA 发布的 MODIS 数据集 (Terra MODIS500 米分辨率 8 天合成地表反射率产品, <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>) 并进行归一化与变异系数计算提取 NDVI、NDBSI、WET、LST、DHI-cum 等指标。DEM 数据来源于地理空间数据云平台, 各行政单元的行政界限、城市驻地等基础地理信息数据来自于国家基础地理信息中心 1:400 万数据库 (<http://www.ngcc.cn/ngcc>)。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务价值评估模型

本研究基于 Costanza 等^[24]和谢高地等^[53]对生态系统服务价值评估的理论研究, 构建生态系统服务价值评估模型。根据京津冀地区 2013—2023 年粮食播种面积、粮食作物产量、农作物价格对生态系统服务的经济价值计算, 标准当量因子采用 1hm^2 耕地年产出的市场经济的 $1/7$ 。具体评估模型如下:

$$VC = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n \frac{m_i p_i q_i}{M} (i = 1, \dots, n) \quad (1)$$

$$ESV = \sum (A_i \times V C_i) \quad (2)$$

$$ESV_j = \sum A_i \times V C_{ij} \quad (3)$$

式中, i 表示包括小麦、玉米、大豆在内的粮食作物; q_i 代表第 i 种粮食作物的单位产量 (kg/hm^2); p_i 代表粮食作物 i 的市场价格 (元/kg); m_i 表示粮食作物 i 的播种面积 (hm^2); M 表示 n 种粮食作物总面积 (hm^2); VC 表示单位面积粮食作物的经济价值 (元/ hm^2)。ESV 代表生态系统服务总价值; ESV_j 表示第 j 项生态系统服务功能价值 (元); A_i 表示土地利用类型 i 的面积 (hm^2); VC_{ij} 表示 i 类土地利用类型的第 j 项服务功能价值系数。此外, 根据研究需求将土地利用数据重分类为耕地、林地、灌木、草原、水域、冰雪、裸地、不透水面、湿地 9 个一级分类后, 鉴于建设用地 (如城镇、农村居民点及交通工矿用地等) 因不透水面比例高, 其生态系统服务功能几近于零^[54], 学界普遍在价值核算时予以忽略, 取其生态系统服务价值当量为 0; 参考谢高地等人关于当量因子的研究^[53], 将一级分类“农田”的当量因子取二级分类“水田”和“旱地”当量因子的算术平均值, 一级分类“林地”则取二级分类“针叶”、“阔叶”、“针阔混交”当量因子的算术平均值。又因本研究采用 1000m 分辨率的一级土地利用栅格分类体系, 与谢高地等人构建的当量因子表在类别划分上并不完全一致, 故本研究单位面积生态系统服务价值当量如表 1 所示。

表 1 单位面积生态系统服务价值当量

Table 1 Equivalent value of ecosystem services per unit area

生态系统分类 Ecosystem classification	供给服务 Supply service			调节服务 Regulating service				支持服务 Support service			文化服务 Cultural service
	食物 生产	原料 生产	水资源 供给	气体 调节	气候 调节	净化 环境	水文 调节	土壤 保持	维持 养分	生物 多样	美学 景观
农田 Cropland	1.11	0.25	-1.31	0.89	0.47	0.14	1.50	0.52	0.16	0.17	0.08
林地 Forest	0.27	0.63	0.33	2.07	6.20	1.50	3.86	2.52	0.19	2.30	1.01
灌木 Shrub	0.19	0.43	0.22	1.41	4.23	1.28	3.35	1.72	0.13	1.57	0.69
草原 Grassland	0.1	0.14	0.08	0.51	1.34	0.44	0.98	0.62	0.05	0.56	0.25
水域 Water	0.8	0.23	8.29	0.77	2.29	5.55	102.24	0.93	0.07	2.55	1.89
冰雪 Ice	0	0	2.16	0.18	0.54	0.16	7.13	0	0	0.01	0.09
裸地 Barren	0	0	0	0.02	0	0.1	0.03	0.02	0	0.02	0.01
不透水面 Impervious	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
湿地 Wetland	0.51	0.5	2.59	1.9	3.6	3.6	24.23	2.31	0.18	7.87	4.73

由于传统生态系统服务价值评估多基于统计年鉴或土地利用数据, 且价值当量权重通常依赖专家经验, 主观性较强, 可能忽略区域差异, 无法反映生态系统服务的时空动态变化, 而遥感生态指数包含影响生态系统的时空动态调节因子, 能够实现“生态状态-服务价值”的直接关联。参考魏之首等^[36]研究, 通过引入影响生态系统结构与功能的生态要素及生物多样性指标, 能够增强对区域生物多样性的敏感性, 从而以更多维度、更高精度刻画生态系统服务价值的空间异质性, 更全面、客观地揭示研究区的生态系统服务价值格局, 构建遥感生态指数 (RSEI) 与动态栖息地指数 (DHI-cum) 相结合的改进型遥感生态指数 (DRSEI) 作为时空动态调节因子, 用以改进京津冀地区的生态系统服务价值评估方法。遥感指标及计算如表 2 所示。

在构建时空动态调节因子时, 首先将各遥感评价指标归一化至 $[0, 1]$ 区间, 随后利用熵权法确定其权重。计算指标 j 中样本点 i 的比重和指标 j 的熵值:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad (4)$$

$$E_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (5)$$

表 2 改进型遥感生态指标选取

Table 2 Selection of improved remote sensing ecological indicators

指标类型 Indicator type	变量 Variable	计算方法 Calculation method
绿度 Greenness	NDVI	$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_r}{\rho_{nir} + \rho_r}$ 式中: ρ_{nir} 和 ρ_r 分别表示 Landsat 8 影像的近红外波段的及红波段的反射率值。
湿度 Humidity	Wet	$Wet = 0.15\rho_2 + 0.2\rho_3 + 0.33\rho_4 + 0.34\rho_5 - 0.71\rho_6 - 0.46\rho_7$ 式中: ρ_i 为 Landsat8 数据波段的反射率值。
干度 Dryness	NDBSI	$NDBSI = \frac{IBI + SI}{2}$, $IBI = \frac{2\rho_5}{\rho_5 + \rho_4} - \left(\frac{\rho_4}{\rho_3 + \rho_4} + \frac{\rho_2}{\rho_2 + \rho_5} \right)$, $SI = \frac{(\rho_s + \rho_3) - (\rho_4 + \rho_l)}{(\rho_s + \rho_3) + (\rho_4 + \rho_l)}$
热度 Heat	LST	$L_\lambda = gain \times DN + offset$, $LST = K_2 / \log \left(\left(\frac{K_1}{L_\lambda} \right) + 1 \right)$ DN 为像元灰度值; gain 和 offset 分别为热红外波段的增益值与偏置值; K_1 和 K_2 分别为热红外波段定标参数。
生物多样性 Biodiversity	DHI-cum	$DHI-cum = \sum_{month} MAX_{layer, FPAR}$ MAX _{layer, FPAR} 是植被光合有效辐射吸收比例 (FPAR) 波段月最大值。

NDVI: 归一化差值植被指数 Normalized Difference Vegetation Index; NDBSI: 归一化差值建筑与裸土指数 Normalized Difference Built-up and Soil Index; LST: 地表温度 Land Surface Temperature; DHI-cum: 年累计生产力 Dynamic Habitat Index-cumulative

其次, 计算各指标权重:

$$w_j = \frac{l - E_j}{m - \sum_{j=1}^m E_j} \quad (6)$$

然后, 计算时空动态调节因子:

$$DRSEI = \sum_{j=1}^5 w_j \times x_{ij} \quad (7)$$

$$RSEI = \sum_{j=1}^4 w_j \times x_{ij} \quad (8)$$

基于改进型遥感生态指数的生态系统服务价值计算模型如下:

$$ESV_c = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_{ij} \times ESV_{ci} \quad (9)$$

$$R_{ij} = \frac{Ad_{ijc}}{\overline{Ad_c}} \quad (10)$$

式中, x_{ij} 表示归一化后的遥感指标 j 第 i 个样本的值; m 为指标的个数 R_{ij} 为像元的调整系数, 其中, Ad_{ijc} 为第 c 类生态系统类型时空动态调节因子平均值, $\overline{Ad_c}$ 为整个研究区的时空动态调节因子平均值。

1.3.2 生态系统服务价值流向损益模型

探讨生态系统服务的价值损益变化可以更加深入地了解生态系统服务价值的转移方向和流动情况, 可以弥补传统生态系统服务价值分析模型仅可表现监测期内由各类土地面积转化所引起的 ESV 数值变化, 无法反映生态系统服务内的损益缺陷。参考温玉玲等^[55]的研究, 以土地利用面积转移矩阵为基础, 计算京津冀地区生态系统服务价值的损益情况, 如式 (6) 所示:

$$P_{ij} = (VC_i - VC_j) \times A_{ij} \quad (11)$$

式中, P_{ij} 表示土地利用类型由 i 类转为 j 类时的生态系统服务价值损益; VC_i 、 VC_j 分别为 i 地类和 j 地类的生态系统服务价值系数; A_{ij} 为 i 地类转为 j 地类的面积。

1.3.3 地理探测器

为识别 ESV 变化的主导驱动因子, 研究采用地理探测器中的因子探测器与交互探测器两种功能。因子探测器用于定量分析单一因子对 ESV 变化空间差异的解释力, 输出 q 值(解释力指数)以反映因子对空间异质性的贡献大小。交互探测器则进一步评估两个因子联合作用下的解释能力, 探讨其协同效应是否大于个体因子。通过对自然因素和社会经济因素两大类因素及 8 个驱动因子进行分析, 具体指标如表 3 所示。

表 3 京津冀地区生态系统服务价值驱动因子指标选取

Table 3 Selection of indicators for driving factors of ecosystem service value in Beijing-Tianjin-Hebei region

影响因素 Influencing factors	初选因子 Primary selection factor	单位 Unit	变量编号 Variable number	变量说明 Variable description
自然因素 Natural factors	地形起伏度	m	X1	参考封志明等 ^[56] 的研究对地形起伏度进行计算, 具体公式如下: $RDLS = ALT/1000 + \{ RALT \times [1 - P(A)/A] \} / 500$ 其中, RDLS 为地形起伏度(m); ALT 表示城市内平均海拔(m); RALT 为城市内平均高差(m); $P(A)$ 为城市内平地面积(km^2); A 为城市总面积(km^2)
	年均气温	℃	X2	城市的年度平均气温
	土地利用程度	/	X3	借鉴胡毅等 ^[57] 的研究对土地利用程度进行计算, 具体公式如下: $F = 100 \times \sum_{i=1}^4 C_i \times B_i$ 其中, F 为土地利用程度指数; C_i 为第 i 级分级指数; B_i 为第 i 级土地利用类型面积占总面积百分比
	年均降水量	mm	X4	城市的年度平均降水
社会经济因素 Socio-economic factors	人均 GDP	元/人	X5	地区生产总值/年末人口总数
	第二产业占比	%	X6	第二产业总产值占地区生产总值百分比
	城镇化率	%	X7	采用城镇常住人口/(城镇常住人口+乡村常住人口)
	人口密度	人/ km^2	X8	年末人口总数/地区总面积

为进一步明确 8 个驱动因子对京津冀地区生态系统服务价值变化的影响程度, 运用地理探测器测算 8 个驱动因子的解释力, 各单因子 q 值计算公式如式(7)所示:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (12)$$

式中, L 表示变量分层; N_h 表示在 h 层的全区单元数; σ^2 表示全区的方差; q 表示某一自变量对因变量的影响大小, 其值域为 $[0, 1]$, q 值越大表示自变量因子对因变量的解释力越大。

1.3.4 人类活动强度(HAI)

为客观且全面的考察 HAI 及其对生态系统服务价值的驱动性, 参考李久林等^[45]对于人类活动强度的理解与计算, 选取 NDVI(植被覆盖程度)、夜间灯光数据、耕地比例、第二产业占比、人口数量、GDP 密度 6 个影响因子构建指标体系, 采用 TOPSIS 熵权法对指标进行标准化并计算权重(表 4), 实现对评价对象的综合分析, 有效降低主观因素影响。由于 NDVI 值表示植被覆盖程度, 其值越大, 代表人类活动强度越弱, 故将 NDVI 定义为负向指标, 其余 5 个指标均为正向指标。

2 结果分析

2.1 土地利用类型变化

表 5 和表 6 分别展示了京津冀地区 2013—2023 年土地利用类型的总体转移情况和耕地转移情况。

表 4 人类活动强度指标体系及权重

Table 4 The index system and weights of human activity intensity

指标 Indicator	植被覆盖程度 Degree of vegetation coverage	夜间灯光数据 Nighttime lighting data	耕地比例 Proportion of cultivated land	第二产业占比 The proportion of the secondary industry	人口数量 Population size	GDP 密度 GDP density
权重 Weight	0.2985	0.0673	0.1144	0.0497	0.1412	0.3289
指标属性 Indicator attribute	正	负	正	正	正	正

表 5 2013—2023 年京津冀地区土地利用类型转移情况

Table 5 The transfer of land use types in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2013 to 2023

2013	2023							
	不透水面 Impervious	草原 Grassland	灌木 Shrub	林地 Forest	裸地 Barren	耕地 Cropland	湿地 Wetland	水域 Water
不透水面 Impervious	18617.701	699.878	194.654	403.338	70.741	7276.137	145.122	1377.048
草原 Grassland	2678.439	19479.449	3011.959	3449.396	238.367	6929.179	179.828	2132.139
灌木 Shrub	506.649	3014.416	9222.291	2244.465	23.235	1743.379	29.071	83.120
林地 Forest	846.016	3027.190	1929.390	19570.850	16.829	2255.843	59.102	158.868
裸地 Barren	108.341	148.954	11.433	16.573	527.985	294.533	66.603	65.977
耕地 Cropland	27389.657	6245.161	1778.841	2577.685	416.246	60707.013	499.693	1694.298
湿地 Wetland	306.142	121.922	17.701	36.172	250.554	280.711	152.158	253.870
水域 Water	45.595	0.793	0.000	0.000	3.698	0.000	28.609	25.347
总计 In total	50498.540	32737.765	16166.270	28298.477	1547.655	79486.794	1160.186	5790.667
变化面积 Area of change	31880.839	13258.316	6943.978	8727.628	1019.669	18779.781	1008.028	5765.321

表 6 2013—2023 年京津冀地区耕地转移情况

Table 6 The situation of cultivated land transfer in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2013 to 2023

转换方向 Change direction	变化类型 Change type	2013—2023 变化面积/km ² The number of areas that changed from 2013 to 2023	变化比例/% Change ratio
耕地转入 Transfer to cultivated land	不透水面→耕地	7276.137	9.15
	草原→耕地	6929.179	8.72
	灌木→耕地	1743.379	2.19
	林地→耕地	2255.843	2.84
	裸地→耕地	294.533	0.37
	湿地→耕地	280.711	0.35
	水域→耕地	0.000	0.00
	合计	18779.781	23.63
耕地转出 Transfer from cultivated land	耕地→不透水面	27389.657	27.04
	耕地→草原	6245.161	6.16
	耕地→灌木	1778.841	1.76
	耕地→林地	2577.685	2.54
	耕地→裸地	416.246	0.41
	耕地→湿地	499.693	0.49
	耕地→水域	1694.298	1.67
	合计	40601.581	40.08

由表 5 可知,从 2013 至 2023 年,不透水面转入总面积最大,为 31880.839km²,湿地转入总面积最小,为 1008.028km²,其中,不透水面指城乡、工矿、居民用地,其转入面积大幅增加的主要原因可能是京津冀地区的城市规模不断扩张,城市化进程加快,建设用地需求量增大。由表 6 可知,2013—2023 年期间,京津冀地区的

耕地面积锐减,且正向其他土地利用类型转化,由耕地向不透水面、草原、灌木、林地、裸地、湿地以及水域转移的总面积分别为 27389.657km^2 、 6245.161km^2 、 1778.841km^2 、 2577.685km^2 、 416.246km^2 、 499.693km^2 、 1694.298km^2 ,可以看出耕地转不透水面和草原的面积最多,其中耕地类型转变的可能原因是区域城镇化和工业进程加快导致水体污染严重,水资源供给量不断减少,水资源严重短缺,致使水田逐渐向草地转移,这也反映出当前京津冀地区仍处于严重缺水阶段。同时,还可以发现,京津冀地区退耕还林还草还湿的趋势较好,林地、草地以及湿地面积均有所增加,究其原因是地方政府推行的“封山育林、退耕还林”等生态修复政策日渐成效。进一步地,由图 2 可知,以承德市、秦皇岛市、北京市、以及张家口市的土地利用面积变化较为集中且明显,表现出大面积的耕地向草地转化,尤其是张家口市的耕地类型变化最为显著,此外,天津市和沧州市存在较为明显的水域向建设用地转化,少部分存在向林地以及湿地转移,保定市、石家庄市、邯郸市以及邢台市的耕地向其他用地类型转移的面积相对较少且分散,而廊坊市和衡水市在研究期内的各类土地面积无明显变化。综合以上分析可知,虽然近年来京津冀地区出台了若干生态保护政策,林地和草地面积有明显增加,但在工业化和城镇化飞速发展的大背景下,耕地和建设用地面积仍占比较大,环境污染问题依旧突出。

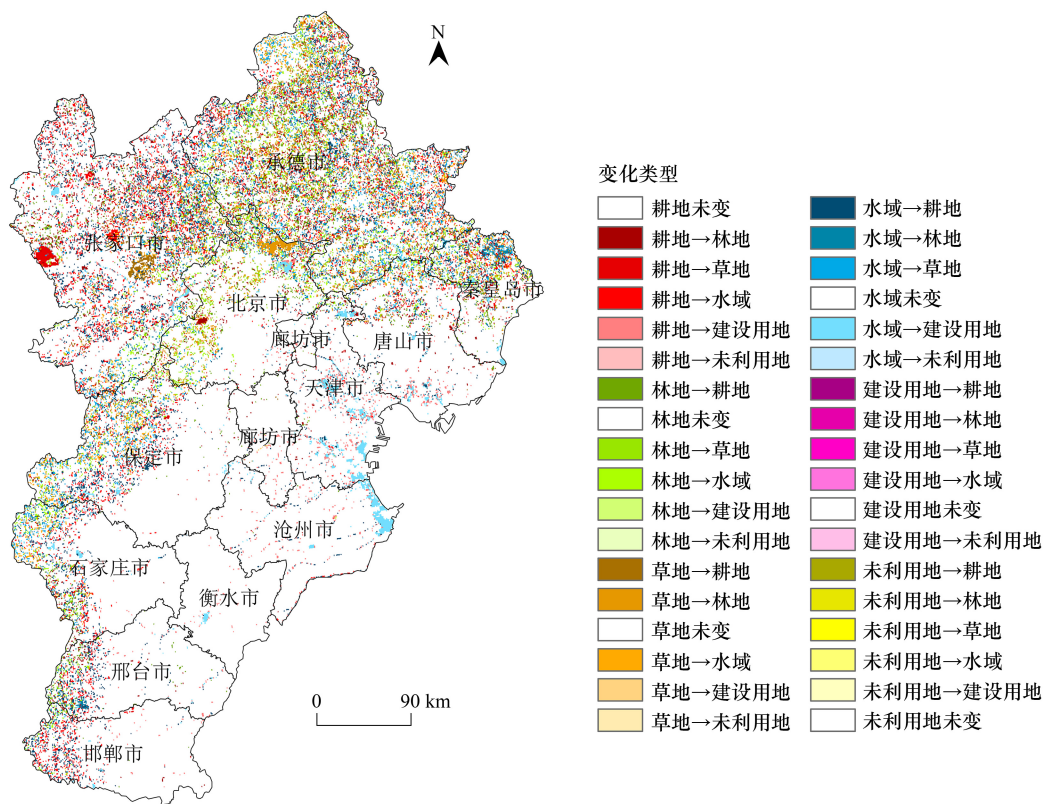


图 2 2013—2023 年京津冀土地用地类型变化图

Fig.2 Changes in land use types in Beijing, Tianjin and Hebei from 2013 to 2023

2.2 DRSEI 与生态系统服务价值空间演变

遥感生态指数能够综合反映生态环境质量,该指数值域范围为 $[0,1]$,数值越接近 1 表示生态环境质量越好。图 3 展示了 2013—2023 年京津冀地区 DRSEI 分布及变化趋势,2013 年 DRSEI 局部最高为 0.978576,2023 年 DRSEI 局部最高为 0.980676,可知研究区遥感生态指数阈值有所提高,说明 2013 至 2023 十年间京津冀地区生态环境有所改善,从总体来看,承德市、张家口市以及秦皇岛市遥感生态指数较高,结合地理高程图可以发现,三市均为山地较多城市,表现出较为明显的高程依赖性;由图 3DRSEI 变化趋势可知,从 2013 年至 2023 年邯郸市、邢台市、石家庄市遥感生态指数增幅最大,均集中在研究区南部,而张家口市、承德市以及秦皇岛市则 DRSEI 值大幅度降低,出现生态退化现象,结合前文土地利用类型变化可以推测 DRSEI 下降的原因

可能在于建设用地增加以及耕地与林地锐减。

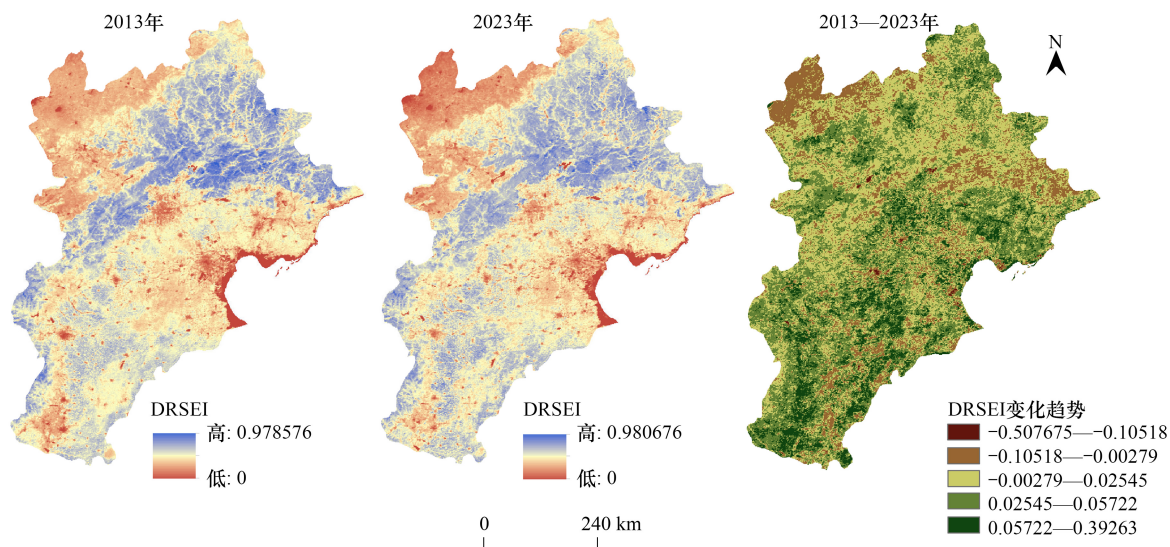


图3 2013—2023年DRSEI变化

Fig.3 The changes of DRSEI in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2013 to 2023

DRSEI:改进型遥感生态指数 Remote sensing ecological index based on DHI-cum

图4展示了2013—2023年京津冀地区生态系统服务价值(ESV)的变化过程。从时间尺度来看,2013年、2015年、2017年、2019年、2021年以及2023年六个时期京津冀地区单位像元ESV上限分别为11.8516亿元、20.0202亿元、21.4152亿元、23.0234亿元、29.4651亿元以及31.4090亿元,ESV上限的提升主要归因于各单项生态系统服务功能的改善,尤其是调节服务和支撑服务在其中发挥了关键作用。从空间尺度来看,研究区生态系统服务价值整体变动水平呈现出南低北高,渤海沿岸高、内陆低的分布格局。2015—2023年京津冀地区ESV变动相对平缓且空间分布较为稳定,ESV的高值区域集中分布在渤海沿岸地区,包括天津市、沧州市以及唐山市;低值区域主要分布于华北平原地带,包括邯郸市、邢台市、衡水市以及廊坊市;中值区域则分布于燕山和太行山地带,包括张家口市、承德市、保定市、北京市以及秦皇岛市。与后5期相比可知,2013年京津冀地区ESV的空间分布差值较小,而自2015年发生明显变化,低值区域面积有显著扩张,中值区域面积表现出大幅度的收缩,高值区域面积有略微减少,并逐渐分化。

2.3 单项生态系统服务功能价值变化

表7展示了2013—2023年京津冀地区各单项生态系统服务功能的价值变化。从整体来看,除水资源供给功能外,总体ESV与各单项生态系统服务功能价值均有大幅度的提升,但从2013年至2017年两期,研究区总体ESV从4489.49亿元下降至3706.12亿元,呈现出收缩态势,可能的原因存在于2013到2017年期间,京津冀地区出现的干旱天气,使得部分地区的植被生长受到抑制,生态系统服务功能下降^[49]。2017年至2023年三期研究区总体ESV则从3706.12亿元上升至8756.05亿元,呈现出强劲的扩张态势,出现这种情况的原因可能是由于政府出台了一系列诸如《京津冀协同发展规划纲要》等生态保护政策,强调生态保护红线的划定和生态修复工程的推进,同时加快了产业结构调整,推动传统产业向绿色、低碳、循环方向发展,减少了高污染、高能耗产业对生态环境的破坏。具体来说,研究期内调节服务功能的价值增加幅度最大,占总ESV的比例大于75%,其主要来源于气候调节和水文调节,总体分别增加了649.49亿元和2025.13亿元。其次是支撑服务功能价值在各时段的占比约在10%左右,主要来源于土壤保持和生物多样性。供给服务功能的价值在总ESV中的平均占比为5.9%,主要来源于食物生产,其价值实现了平均25%的增幅。文化服务功能对总ESV的贡献最小,平均占比约为3.2%。此外,各单项生态系统服务功能的价值波动最为显著的阶段为2019—2021年,此阶段各单项生态系统服务功能的增长幅度最高,使得京津冀地区总体ESV大幅度上升。

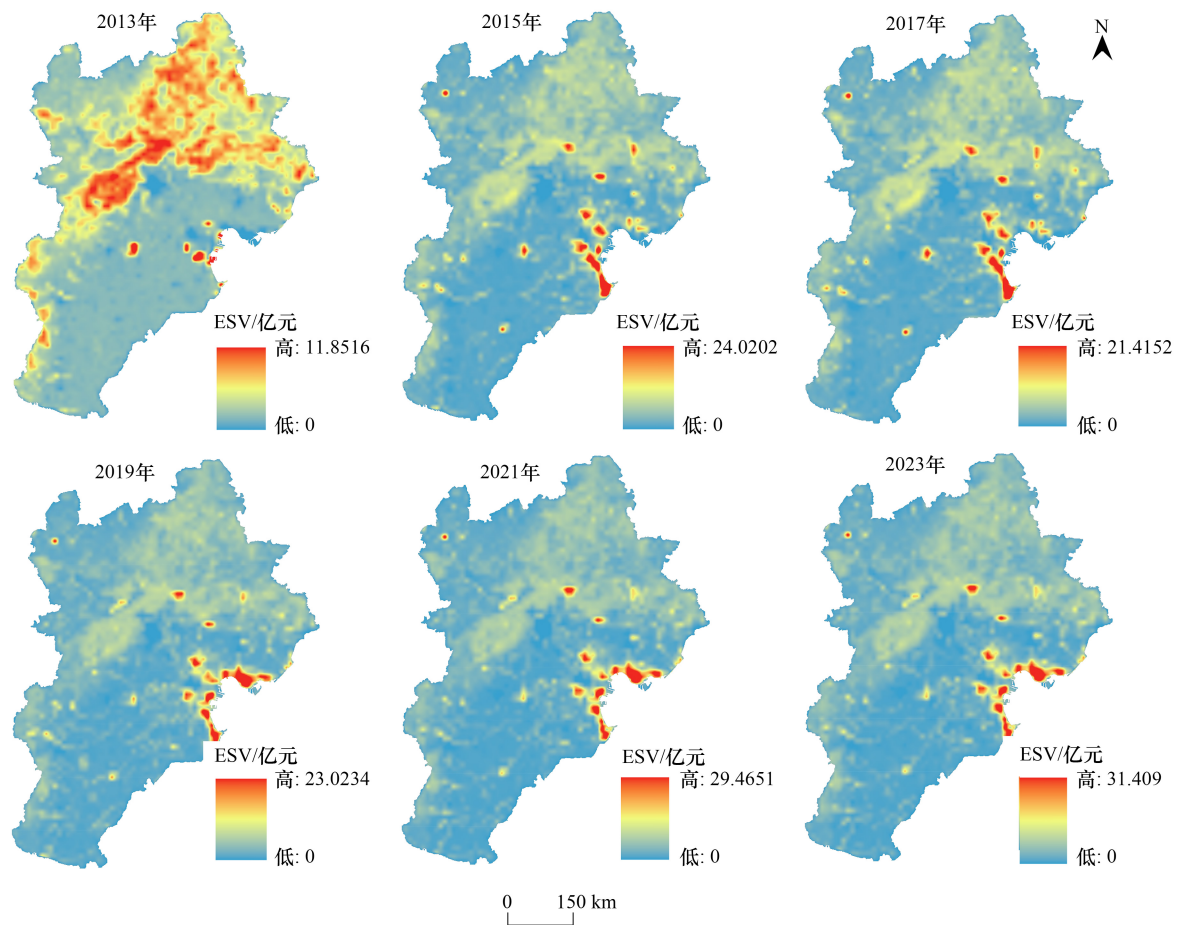


图4 2000—2020年京津冀生态系统服务价值空间演变

Fig.4 Spatial evolution of ecosystem service value in Beijing-Tianjin-Hebei from 2000 to 2020

表7 京津冀地区单项生态系统服务功能价值变化/(亿元)

Table 7 Changes in the value of individual ecosystem service functions in the Beijing-Tianjin-Hebei region

生态系统服务功能 Ecosystem service functions		2013	2015	2017	2019	2021	2023	2013—2023 年 ESV 变化量 The change in ESV from 2013 to 2023
供给服务	食物生产	284.22	271.83	232.82	217.95	452.40	473.67	189.45
Supply service	原料生产	123.33	119.07	101.80	97.89	204.61	216.73	93.40
	水资源供给	-164.79	-156.94	-134.02	-95.99	-194.73	-195.01	-29.94
调节服务	气体调节	428.78	413.77	353.75	339.53	709.47	751.09	322.31
Regulation service	气候调节	778.29	756.48	646.02	636.86	1337.32	1427.78	649.49
	净化环境	268.85	259.88	222.41	230.49	483.97	517.44	248.59
	水文调节	1830.81	1752.44	1506.89	1719.16	3606.55	3855.94	2025.13
支持服务	土壤保持	397.82	385.22	329.13	320.09	670.65	713.17	315.35
Support services	维持养分循环	55.96	53.83	46.04	43.65	90.99	95.92	39.96
	生物多样性	329.70	318.88	272.28	270.59	568.85	607.82	278.12
文化服务	美学景观	156.51	151.04	129.01	129.67	272.69	291.50	134.98
总计 In total		4489.49	4325.50	3706.12	3909.90	8202.77	8756.05	4266.56

2.4 生态系统服务价值损益分析

利用生态系统服务价值损益模型分别计算出 2013—2015、2015—2017、2017—2019、2019—2021、2021—2023 年 5 个阶段京津冀地区 ESV 损益情况(图 5)。整体来看,京津冀地区 ESV 的损失面积呈现出先扩张后收缩的态势。具体而言,在 2013—2017 年阶段存在大面积的 ESV 损失,主要由林地、草地、耕地向不透水面及裸地转移所造成的价值损失,此阶段 ESV 损失基本覆盖研究区全域,而造成这一现象的原因可能是由于大量的林地、草地以及湿地向裸地和不透水面转化,进而导致 ESV 损失逐渐加剧。其中损失最为严重的区域主要位于华北平原,包括邯郸市、邢台市、石家庄市、沧州市、保定市、廊坊市、天津市以及唐山市。在 2017—2019 年阶段,大部分区域的 ESV 变化均在 $[0, 0.195]$ 区间波动,这意味着 ESV 损失得到初步稳定,在 2019—2021 年阶段,京津冀地区的 ESV 损失开始有所好转,大部分区域的 ESV 损益为正,这主要归因于大量建设用地开始向林地和草地转化。在 2021—2023 年阶段,京津冀内部的大部分区域的 ESV 损益变化相对平缓且空间分布较为稳定,这主要是由于各土地利用类型变化趋于稳定,域内气候、生态等极端情况减少。综合分析可知,研究期内京津冀地区 ESV 的空间变化显著,前两期呈现出大面积的损失,表明在该时段存在大量像元的 ESV 降低,而在后三期,京津冀地区的 ESV 变化由负转正,意味着这一时段的 ESV 有显著提升。

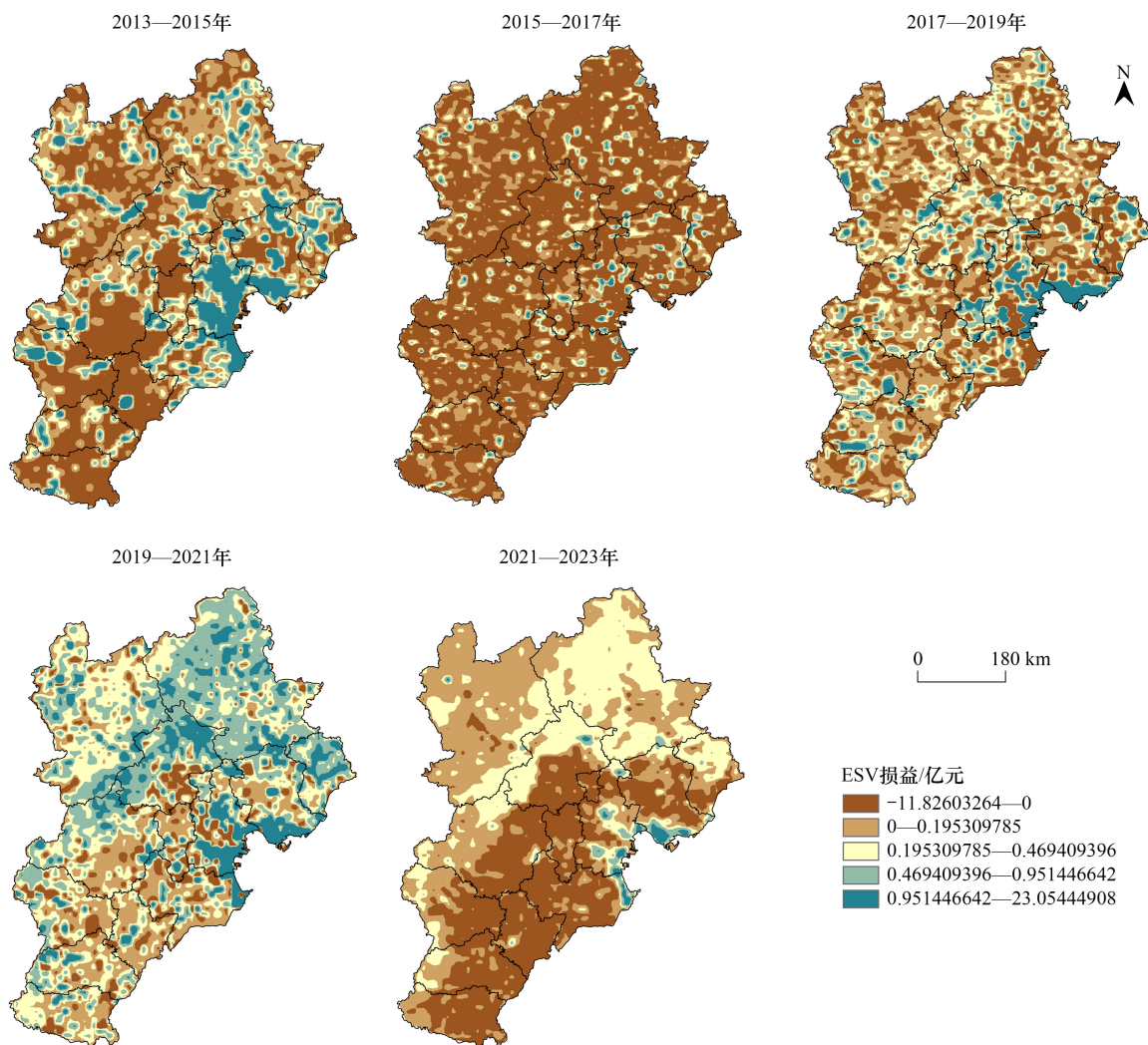


图 5 2013—2023 年京津冀生态系统服务价值损益空间分布

Fig.5 Spatial distribution of profit and loss of Beijing-Tianjin-Hebei ecosystem service value from 2000 to 2020

2.5 生态系统服务价值的驱动因素分析

2.5.1 单因子驱动因素分析

表 8 是利用地理探测器测算出的各驱动因子对生态系统服务价值(ESV)的影响程度,可以看出,本文所筛选的 8 个驱动因子的 q 值均大于 0.1,表明这些因子对 ESV 的变化都具有较强的解释力,且 P 值均通过了 1% 的显著性检验。进一步地,根据 q 值大小,将驱动因子的解释力进行排序, $X5(\text{人均 GDP}) > X1(\text{地形起伏度}) > X8(\text{人口密度}) > X3(\text{土地利用程度}) > X7(\text{城镇化率}) > X6(\text{第二产业占比}) > X2(\text{年均气温}) > X4(\text{年均降水量})$,其中 $X5$ 和 $X1$ 的 q 值要明显大于其余的驱动因子,这说明人均 GDP 和地形起伏度在 ESV 的变化过程中发挥了主要驱动作用。此外,根据探测结果可知,相比自然因素,社会经济因素对 ESV 的影响更大。

表 8 地理探测器探测结果

Table 8 Geodetector detection results

探测因子 Detector factor	地形起伏度 Terrain undulation	年均气温 Average annual temperature	土地利用程度 Degree of land use	年均降水量 Annual average precipitation	人均 GDP Per capita GDP	第二产业占比 The proportion of the secondary industry	城镇化率 Urbanization rate	人口密度 Population density
q	0.5161	0.3875	0.4580	0.2708	0.7095	0.4002	0.4184	0.4873
P	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

具体而言,一方面,人均 GDP、人口密度的 q 值均较高,在解释力排序中位居前列,表明社会经济发展是影响 ESV 的主要驱动因素,且这一结果与现有研究大体一致^[58-59]。同时,城镇化率和第二产业占比的贡献分别为 0.4184 和 0.4002,这意味着区域城市化和工业化对生态系统的物质循环和能量流动也会产生重要影响;另一方面,自然条件的变化可以通过改变栖息地和资源时空分布影响生态系统的结构和功能^[60-61]。从表中也能看出,地形起伏度和土地利用程度的贡献度分别为 0.5161 和 0.4580,说明土地利用结构的变化会使区域 ESV 总值发生变化。此外,气温和降水量对 ESV 变化的贡献度分别为 0.3875、0.2708,表明气候变化也会影响生态系统服务功能。

2.5.2 人类活动强度(HAI)与交互探测分析

随着全球变暖、臭氧层空洞、酸雨、森林锐减与生物多样性丧失、荒漠化与水资源短缺、海洋污染及危险废物越境转移等议题集中爆发,人类对自然过程的扰动逐渐成为全球科学界瞩目的焦点。南箔等学者发现人类活动强度作为 ESV 的驱动因素之一,其与 ESV 呈空间负相关^[62],为进一步考察人类活动强度与是否与其他因素对 ESV 产生叠加影响,构建包括 NDVI(植被覆盖程度)、夜间灯光数据、耕地比例、第二产业占比、人口数量、GDP 密度 6 个影响因子在内的指标体系,采用 TOPSIS 熵权法对指标进行标准化并赋权得到 2013—2023 年人类活动强度指数,并进行交互探测分析。

对比图 6 研究区 13 个城市十年间人类活动强度动态变化可以发现,从时间维度来看,各城市 HAI 值大体呈现上升态势,但在 2013—2017 年间均有所下降,2017—2023 年逐期上升;从城市维度来看,北京市、天津市等经济活力较强的地区人类活动强度较高,并且在 2023 年分别达到峰值 0.7466 和 0.6801,其他城市的人类活动强度则较为平稳,但也有一些城市在某些年份表现出较高的人类活动强度,比如 2021 年唐山市 HAI 值为 0.3523,2023 年廊坊市 HAI 值为 0.3646。总体来看,北京市和天津市作为中国北方的重要经济中心,吸引了大量的人口和投资,随着城市化进程的加快,基础设施建设和城市扩张也推动了人类活动的增加。

交互探测结果表明,各因子对研究区 ESV 作用呈现双因子增强和非线性增强,表明京津冀地区 ESV 不仅受各驱动因子单独作用,同时也会受到驱动因子叠加影响。其中 $X1(\text{地形起伏度})$ 与 $X2(\text{年均气温})$ 、 $X1(\text{地形起伏度})$ 与 $X3(\text{土地利用程度})$ 、 $X2(\text{年均气温})$ 与 $X3(\text{土地利用程度})$ 、 $X3(\text{土地利用程度})$ 与 $X9(\text{人类活动强度})$ 呈双因子驱动非线性增强, $X3(\text{土地利用程度})$ 与 $X4(\text{年均降水量})$ 的交互作用解释力最强,一方面,生态系统是一个复杂的有机整体,其内部结构包括生物群落、土壤、水体等多个组成部分,它们相互依存、相互作用,土地利用程度会影响生态系统内部的结构和组成,进而影响生态系统的稳定性和服务价值,而年均降水量

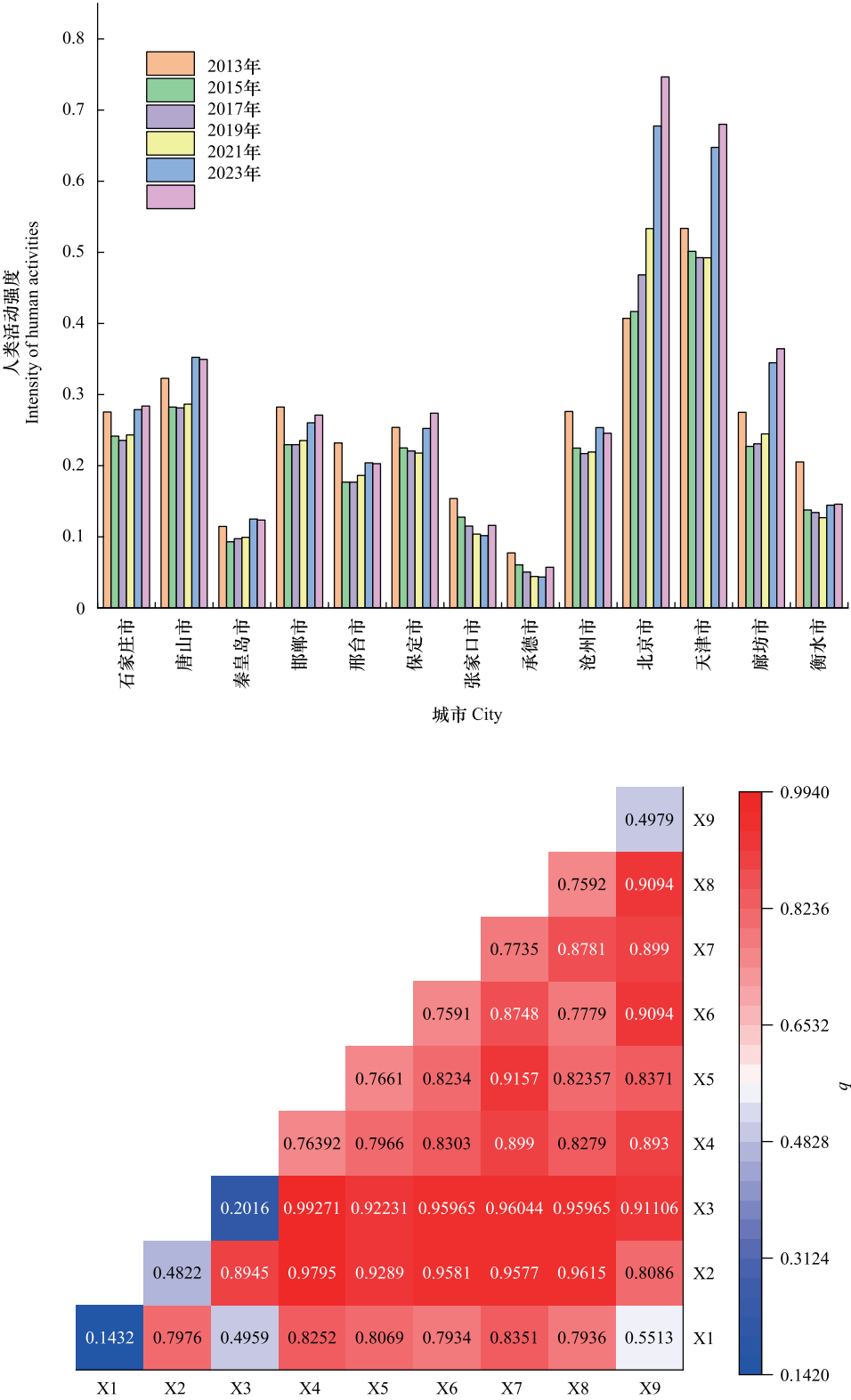


图 6 生态系统服务价值的驱动因素分析

Fig.6 Analysis of the driving factors of ecosystem service value

X1 地形起伏度; X2 年均气温; X3 土地利用程度; X4 年均降水量; X5 人均 GDP; X6 第二产业占比; X7 城镇化率; X8 人口密度

则会影响生态系统内部的水分循环和分布,进而影响生物的生存和繁衍。当土地利用程度和年均降水量共同作用时,它们会通过复杂的生态过程相互影响,产生交互作用,进而增强对生态系统服务价值的影响。此外, X2(年均气温)与 X4(年均降水量)、X2(年均气温)与 X8(人口密度)、X3(土地利用程度)与 X7(城镇化率)的交互作用解释力同样高于 0.9,表明自然因素和社会经济因素以及人类活动交互影响 ESV 分异,因此,为了生态系统管理决策应控制人类活动对生态环境的影响,加快产业结构转型升级、合理利用土地资源,实现区域经济发展与生态环境保护的共赢。

3 结论与讨论

3.1 结论

本研究基于土地利用/土地覆盖遥感监测数据,旨在探讨京津冀地区生态系统服务价值的时空演变趋势及其影响因素。研究发现,研究期内京津冀地区 ESV 总体呈现出先减后增的变化态势,尤其是在 2019—2021 年 ESV 的涨幅最大,整体变动水平呈现出南低北高,渤海沿岸高、内陆低的分布格局,气候调节和水文调节服务价值显著增加;研究期内京津冀地区存在大量耕地向其他土地利用类型转化,ESV 损益情况分析表明,京津冀地区的 ESV 变化呈现出先损失后增益再平稳的态势;地理探测器结果表明,社会经济因素对 ESV 的解释作用要强于自然因素,且人均 GDP 贡献度最高,而年均气温、年均降水对 ESV 的影响程度相对较弱,各城市 HAI 值大体呈现上升态势,北京市、天津市等经济活力较强的地区人类活动强度较高;交互探测结果显示自然因素和社会经济因素以及人类活动交互影响 ESV 分异。

本研究采用添加了生物多样性指标的改进型遥感生态指数系统评估了京津冀地区生态系统服务价值的动态变化,研究结果表明,加强生态保护和修复措施可以显著提升生态系统服务价值,为区域生态补偿机制的优化提供了科学依据,也为京津冀地区的可持续发展提供重要参考。生态环境保护作为区域经济可持续发展的前提和基础,应突破行政区域限制,提高整体生物多样性功能。近年来由于城市化和工业化进程的持续推进,京津冀地区的生态系统服务功能对人类活动的敏感性逐渐增强。地方政府应适当放缓城市发展进程,加快完善资源环境动态监控机制,不断推进绿色基础设施建设和产业结构转型升级,以防止生态系统服务功能的进一步退化。此外,当前京津冀地区水资源短缺、土地利用不合理以及大气污染等问题依然严峻。因此,政府应健全生态系统补偿机制,积极实施封山育林、退耕还林还草还湿等生态修复工程,增强生态系统在涵养水源、保持水土、调节气候等方面的作用,从而实现京津冀地区经济的可持续发展。

3.2 讨论

京津冀地区是拉动中国经济社会发展的核心经济区域之一,但其人类活动导致的环境污染和极端天气等自然灾害方面的矛盾和冲突使得生态环境治理面临巨大挑战,生态系统服务价值难以有效提升。本研究数据分析时间尺度采用的是两年期,相较于五年期尺度所收集到的数据更接近当前的实际情况,也更加能够反映生态系统服务价值的变化细节。ESV 受到多种因素的影响,如经济发展模式、人口流动、政策变化等,五年的时间跨度足以使得这些因素经历重大调整,从传统制造业向高新技术产业转型,能够给生态系统服务价值带来深远影响,容易产生 ESV 变化是一蹴而就的错觉。而两年期的研究时间可以更好地反映近期的生态系统服务价值状况,避免因时间跨度过长而导致数据与现实情况脱节,这一特征在生态系统服务价值损益变化中尤为突出,由前文可知生态系统服务价值损失呈现出 2013—2015 年 ESV 损失扩张、2015—2017 年 ESV 损失最为严重、2019—2021 年大部面积 ESV 损益为正、2021—2023 年 ESV 损益平稳的态势,这期间出现了 ESV 先减少后增加、人类活动强度先减弱后增强等变化,若采用 5 年期数据为尺度,则容易忽略研究区 ESV 的变化细节,将研究区 ESV 变化误判为直线上升趋势。现有研究发现京津冀地区 ESV 总价值的变化与许多单因子相关,如土地利用类型变化^[63]、城镇化与生态建设^[64]等,但 ESV 受到自然因素和社会经济因素等多因素影响,本研究与现有相关研究成果相比,并非仅考虑单因子驱动对 ESV 的影响,而是采用交互探测器方法,能够更加客观、全面的评估包含地形起伏度、年均气温、土地利用程度、人类活动强度等在内的多种驱动因子共同

作用时对 ESV 空间分化的影响。

然而,本研究也存在一定的局限性。一是数据主要来源于现有的监测站点,可能无法完全反映整个京津冀地区的生态系统服务价值变化情况。样本数据以省(直辖市)级和地级市尺度为研究单元,虽可以解决京津冀地区边界明确的问题,但要更精准地确定京津冀地区生态系统服务价值,亟需以县级行政区,甚至更小尺度为研究单元。样本量的限制可能使研究结果在统计上存在一定的不确定性。二是研究方法主要基于现有的生态系统服务价值评估模型,可能无法完全捕捉到所有生态系统服务之间潜在的非线性关系和复杂的相互作用。未来研究可以进一步优化生态系统服务价值评估模型,以提高研究结果的准确性和可靠性。未来的研究应注重模型参数和情景配置的本地化校准,同时考虑到区域特定的生物物理条件和政策优先级,以增强生态系统服务价值评估模型的区域适应性和政策相关性,此外,必须加强生态土地利用的监管和分类,特别强调研究区关键生态功能的完整性和连通性。同时,建议未来研究扩大样本范围,采用更先进的监测技术和模型,利用高分辨率遥感数据改善空间细节,以更全面地评估京津冀地区生态系统服务价值的变化,并开发用户友好型网络平台,向利益相关者立体呈现京津冀地区生态系统服务价值时空演化特征。三是本研究对京津冀地区生态系统服务价值的驱动因素研究局限于部分经济、社会和环境因素,未来研究可以进一步探讨不同生态系统类型对生态系统服务价值的具体贡献,以及气候变化对生态系统服务价值的长期影响。

参考文献(References):

- [1] Kareiva P, Wennergren U. Connecting landscape patterns to ecosystem and population processes. *Nature*, 1995, 373(6512): 299-302.
- [2] Lindenmayer D B, Franklin J F. Managing stand structure as part of ecologically sustainable forest management in Australian Mountain Ash Forests. *Conservation Biology*, 2020, 11(5): 1053-1068.
- [3] 牛忠恩, 何洪林, 张梦宇, 任小丽, 张黎, 冯莉莉, 秦克玉. 2003—2020 年中国陆地生态系统质量评价及归因分析. *地理学报*, 2025, 80(7): 1901-1919.
- [4] 郭珊, 蒋博, 吉雪强. 极端气候对粮食生产的影响及其作用机制——兼论农地流转的调节与门槛效应. *生态学报*, 2025, 45(7): 3169-3182.
- [5] Zhang Z P, Xia F Q, Yang D G, Huo J W, Wang G L, Chen H X. Spatiotemporal characteristics in ecosystem service value and its interaction with human activities in Xinjiang, China. *Ecological Indicators*, 2020, 110: 105826.
- [6] 张贤, 刘彦随, 王伟, 薛岩欣, 李博远, 金淑贞. 基于 PLUS-InVEST 模型的中国多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响. *生态学报*, 2025; 1-17. (2025-07-11). <https://link.cnki.net/doi/10.20103/j.stxb.202501180162>.
- [7] 欧阳晓, 贺清云, 朱翔. 多情景下模拟城市群土地利用变化对生态系统服务价值的影响——以长株潭城市群为例. *经济地理*, 2020, 40(1): 93-102.
- [8] Kim I, Arnhold S. Mapping environmental land use conflict potentials and ecosystem services in agricultural watersheds. *Science of the Total Environment*, 2018, 630: 827-838.
- [9] Talukdar S, Singha P, Mahato S, Praveen B, Rahman A. Dynamics of ecosystem services (ESs) in response to land use land cover (LU/LC) changes in the lower Gangetic plain of India. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106121.
- [10] King R T. *Wildlife and Man*. NY Conservationist, 1966, 20(6): 8-11.
- [11] Helliwell D R. Valuation of wildlife resources. *Regional Studies*, 1969, 3(1): 41-47.
- [12] Ehrlich P R, Ehrlich A H. *Extinction: the causes and consequences of the disappearance of species*. New York: Random House, 1981.
- [13] Haines-Young R, Potschin M. *The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being//Ecosystem Ecology*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2010: 110-139.
- [14] Goldstein J H, Caldarone G, Duarte T K, Ennaanay D, Hannahs N, Mendoza G, Polasky S, Wolny S, Daily G C. Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(19): 7565-7570.
- [15] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [16] Cairns Jr J. Protecting the delivery of ecosystem services. *Ecosystem Health*, 1997, 3(3): 185-194.
- [17] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价. *应用生态学报*, 1999, 10(5): 635-640.
- [18] de Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 393-408.

- [19] Jackson R B, Burd S D. Systems analysis and design in a changing world. Cengage learning, 2015.
- [20] Grimmond S, Bouchet V, Molina L T, Baklanov A, Tan J G, Schlünzen K H, Mills G, Golding B, Masson V, Ren C, Voogt J, Miao S G, Lean H, Heusinkveld B, Hovespyan A, Teruggi G, Parrish P, Joe P. Integrated urban hydrometeorological, climate and environmental services: Concept, methodology and key messages. *Urban Climate*, 2020, 33: 100623.
- [21] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-196.
- [22] Sutton P C, Anderson S J, Costanza R, Kubiszewski I. The ecological economics of land degradation: Impacts on ecosystem service values. *Ecological Economics*, 2016, 129: 182-192.
- [23] Schild J E M, Vermaat J E, de Groot R S, Quatrini S, van Bodegom P M. A global meta-analysis on the monetary valuation of dryland ecosystem services: The role of socio-economic, environmental and methodological indicators. *Ecosystem Services*, 2018, 32: 78-89.
- [24] Costanza R, de Groot R, Sutton P, van der Ploeg S, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S, Turner R K. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [25] Blanusa T, Garratt M, Cathcart-James M, Hunt L, Cameron R W F. Urban hedges: a review of plant species and cultivars for ecosystem service delivery in north-west Europe. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 44: 126391.
- [26] 郭紫荆, 曾辉. 基于 meta 分析的中国森林生态系统服务价值评估. *生态学报*, 2021, 41(14): 5533-5545.
- [27] Xu X B, Jiang B, Tan Y, Costanza R, Yang G S. Lake-wetland ecosystem services modeling and valuation: Progress, gaps and future directions. *Ecosystem Services*, 2018, 33: 19-28.
- [28] 刘佳佳, 黄甘霖. 锡林郭勒盟和锡林浩特市草原生态系统服务与人类福祉的关系研究综述. *草业科学*, 2019, 36(2): 573-593.
- [29] Aznar-Sánchez J A, Velasco-Muñoz J F, Belmonte-Ureña L J, Manzano-Agugliaro F. The worldwide research trends on water ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2019, 99: 310-323.
- [30] 周隽如, 姚焱中, 蒋含明, 樊雨, 宋有涛. 海洋生态系统服务价值研究热点及主题演化——基于文献计量研究. *生态学报*, 2022, 42(9): 3878-3887.
- [31] 杜金鸿, 刘方正, 周越, 张立博, 冯春婷, 王伟. 自然保护地生态系统服务价值评估研究进展. *环境科学研究*, 2019, 32(9): 1475-1482.
- [32] 赵海兰. 生态系统服务分类与价值评估研究进展. *生态经济*, 2015, 31(8): 27-33.
- [33] 陈东军, 钟林生. 生态系统服务价值评估与实现机制研究综述. *中国农业资源与区划*, 2023, 44(1): 84-94.
- [34] 刘耕源. 生态系统服务功能非货币量核算研究. *生态学报*, 2018, 38(4): 1487-1499.
- [35] 潘耀忠, 史培军, 朱文泉, 顾晓鹤, 范一大, 李京. 中国陆地生态系统生态资产遥感定量测量. *中国科学: D 辑: 地球科学*, 2004, 34(4): 375-384.
- [36] 魏之首, 关燕宁, 蔡丹路, 张春燕, 姚武韬, 廖周伟, 邓锐, 钱佳琪, 夏亦寒, 郭杉. 基于改进型遥感生态指数的生态系统服务价值评估方法. *地球信息科学学报*, 2024, 26(7): 1763-1778.
- [37] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. *资源科学*, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [38] 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.
- [39] 严长安, 杨汝兰, 付潇华, 刘艳, 吴文俊. 土地利用变化对滇池流域生态系统服务价值的影响. *生态学报*, 2023, 43(15): 6194-6202.
- [40] 颜建军, 熊万灵, 刘亦文, 李铭轩. 生态治理政策对国家重大战略区域生态系统变化的影响——以京津冀地区为例. *生态学报*, 2025: 1-15. (2025-09-02). <https://link.cnki.net/doi/10.20103/j.stxb.202502150303>.
- [41] Estoque R C, Myint S W, Wang C Y, Ishitake A, Aung T T, Emerton L, Ooba M, Hijioka Y, Mon M S, Wang Z, Fan C. Assessing environmental impacts and change in Myanmar's mangrove ecosystem service value due to deforestation (2000—2014). *Global Change Biology*, 2018, 24(11): 5391-5410.
- [42] Estoque R C, Murayama Y. Landscape pattern and ecosystem service value changes: Implications for environmental sustainability planning for the rapidly urbanizing summer capital of the Philippines. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 116: 60-72.
- [43] Roy S K, Alam M T, Mojumder P, Mondal I, Al Kafy A, Dutta M, Ferdous M N, Al Mamun M A, Mahtab S B. Dynamic assessment and prediction of land use alterations influence on ecosystem service value: a pathway to environmental sustainability. *Environmental and Sustainability Indicators*, 2024, 21: 100319.
- [44] 刘永婷, 杨钊, 徐光来, 杨强强, 刘世杰, 何开玲. 基于四象限模型的生态系统服务与人类活动强度关联性分析——以皖南国际旅游文化示范区为例. *生态学报*, 2022, 42(13): 5200-5210.
- [45] 李久林, 雷秋慧, 胡大卫, 李瑶, 尹海伟. 长江经济带人类活动强度与生态系统服务价值时空关联特征分析. *长江流域资源与环境*, 2024, 33(9): 1992-2003.
- [46] Song W, Deng X Z. Effects of urbanization-induced cultivated land loss on ecosystem services in the North China Plain. *Energies*, 2015, 8(6): 5678-5693.
- [47] 刘菁华, 李伟峰, 周伟奇, 韩立建, 钱雨果. 京津冀城市群扩张模式对区域生态安全的影响预测. *生态学报*, 2018, 38(5): 1650-1660.

- [48] 任胤铭, 刘小平, 许晓聪, 孙嵩松, 赵林峰, 梁迅, 曾莉. 基于 FLUS-InVEST 模型的京津冀多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响. 生态学报, 2023, 43(11): 4473-4487.
- [49] 马冰滢, 黄姣, 李双成. 基于生态-经济权衡的京津冀城市群土地利用优化配置. 地理科学进展, 2019, 38(1): 26-37.
- [50] 李云燕, 黄姗, 张彪, 姜瑛楠. 北京市生态涵养区生态服务价值评估与生态补偿机制探讨. 中国环境管理, 2019, 11(5): 94-99, 106.
- [51] 苑清敏, 张泉, 李健. 京津冀协同发展背景下合作生态补偿量化研究. 干旱区资源与环境, 2017, 31(8): 50-55.
- [52] 徐新良, 刘纪远, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新. 中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC). 中国科学院地理科学与资源研究所数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/DOI>), 2018. DOI:10.12078/2018070201.
- [53] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [54] 陈俊成, 李天宏. 中国生态系统服务功能价值空间差异变化分析. 北京大学学报: 自然科学版, 2019, 55(5): 951-960.
- [55] 温玉玲, 张小林, 魏佳豪, 王晓龙, 蔡永久. 鄱阳湖环湖区生态系统服务价值时空变化及权衡协同关系. 地理科学, 2022, 42(7): 1229-1238.
- [56] 封志明, 张丹, 杨艳昭. 中国分县地形起伏度及其与人口分布和经济发展的相关性. 吉林大学社会科学学报, 2011, 51(1): 146-151, 160.
- [57] 胡毅, 乔伟峰, 何天祺. 江淮生态经济区土地利用格局及生态系统服务价值变化. 长江流域资源与环境, 2020, 29(11): 2450-2461.
- [58] 潘梅, 陈天伟, 黄麟, 曹巍. 京津冀地区生态系统服务时空变化及驱动因素. 生态学报, 2020, 40(15): 5151-5167.
- [59] Msofe N K, Sheng L X, Li Z X, Lyimo J. Impact of land use/cover change on ecosystem service values in the kilombero valley floodplain, southeastern Tanzania. Forests, 2020, 11(1): 109.
- [60] Su K, Wei D Z, Lin W X. Evaluation of ecosystem services value and its implications for policy making in China: A case study of Fujian Province. Ecological Indicators, 2020, 108: 105752.
- [61] Rukundo E, Liu S L, Dong Y H, Rutebuka E, Asamoah E F, Xu J W, Wu X. Spatio-temporal dynamics of critical ecosystem services in response to agricultural expansion in Rwanda, East Africa. Ecological Indicators, 2018, 89: 696-705.
- [62] 南笛, 杨子寒, 毕旭, 付奇, 李波. 生态系统服务价值与人类活动的时空关联分析——以长江中游华阳河湖群地区为例. 中国环境科学, 2018, 38(9): 3531-3541.
- [63] 娄佩卿, 付波霖, 林星辰, 闭璐, 马瑞雪, 唐廷元. 基于 GEE 的 1998—2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响. 环境科学, 2019, 40(12): 5473-5483.
- [64] 段维利, 余新晓, 陈丽华, 贾国栋, 曹永翔. 京津冀城市群城镇化与生态建设对生态系统服务价值的影响. 水土保持研究, 2023, 30(4): 404-411.