超星·期刊



解铭威,冉 黎,贾文贞,等.忻州市生态系统服务时空变化及城镇化响应 [J]. 中国环境科学, 2024,44(8):4557-4566.
Xie M W, Ran L, Jia W Z, et al. Spatiotemporal changes of ecosystem services and their response to urbanization in Xinzhou City [J]. China Environmental Science, 2024,44(8):4557-4566.

# 忻州市生态系统服务时空变化及城镇化响应

解铭威,冉 黎,贾文贞,周慧荻,王向荣*(北京林业大学园林学院,北京 100083)

**摘要**：为探究忻州市生态系统服务(ESs)的时空变化情况,分析 ESs 对城镇化的响应,以 1995~2020 年 6 期土地利用数据为基础,选取 3 项城镇化指标和 4 项 ESs 指标,借助 InVEST 模型和修正通用土壤流失方程(RUSLE)等评估 ESs,并使用 K-均值聚类识别生态系统服务簇,采用皮尔逊相关性分析 ESs 间权衡协同关系及其对城镇化的响应.结果表明:忻州市土地利用类型以草地、耕地和林地为主,1995~2020 年建设用地扩张 280.7km$^2$,林地增加 1201.4km$^2$,草地增加 511.4km$^2$,耕地和水域面积减少.有较多耕地向草地、草地向林地转移.建设用地、GDP 和人口持续增长,2005~2015 年是城镇化较快的时期.1995~2020 年食物供给能力稳步提升,碳储量在 2015 年以后明显提升,生境质量先升后降,水土保持量先降后升.以草地为主的功能复合型服务簇面积占比达 51.4%,各 ESs 间主要呈协同关系,生境质量、土壤保持与城镇化指标间存在负相关.研究结果为忻州市土地管理与生态保护提供决策依据.

**关键词**：生态系统服务；城镇化；土地利用变化；生态系统服务簇；忻州市
**中图分类号**：X171.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2024)08-4557-10

**Spatiotemporal changes of ecosystem services and their response to urbanization in Xinzhou City.** XIE Ming-wei, RAN Li, JIA Wen-zhen, ZHOU Hui-di, WANG Xiang-rong* (School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China). *China Environmental Science*, 2024,44(8)：4557~4566

**Abstract**：In order to investigate the spatial and temporal changes of ecosystem services (ESs) in Xinzhou City and analyze the response of ESs to urbanization, three urbanization indicators and four ESs indicators were selected based on six periods of land use data from 1995 to 2020, while ESs were assessed with the help of the InVEST model and the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Moreover, K-means clustering was used to identify ecosystem services bundles (ESB). Besides, Pearson correlation coefficient was used to analyze the trade-offs and synergies among ESs and their responses to urbanization. The results showed that: (1) Land use types in Xinzhou City were dominated by grassland, arable land and forest, with construction land expanding by 280.7km$^2$, forest increasing by 1201.4km$^2$, grassland increasing by 511.4km$^2$, and arable land and water area decreasing in the period from 1995 to 2020. There was a greater shift from arable land to grassland and from grassland to forest. (2) Construction land, GDP and population continued to grow, and 2005~2015 was a period of rapid urbanization.1995~2020 the food provision steadily improved, carbon stock significantly increased after 2015, habitat quality firstly increased and then decreased, soil retention firstly decreased and then increased. (3) The area of grassland-based functional complex ecosystem services bundles accounted for 51.4%, with mainly synergistic relationships among ESs, and negative correlation between habitat quality-urbanization and soil retention-urbanization. The results of this study can provide scientific basis for land management and ecological protection in Xinzhou City.

**Key words**：ecosystem services (ESs)；urbanization；land use change；ecosystem services bundle (ESB)；Xinzhou City

生态系统服务(ESs)指从生态系统中直接或间接获取供给、支持、调节及文化产品和服务[1-2].而土地作为地理实体将自然与社会紧密联系,土地利用变化影响生态系统的供给与分配[3],从而显著影响 ESs[4].过去 30 年中国不少城市经历了快速城镇化,至 2021 年中国人口城镇化率已达 64.72%[5],城镇化带来建设用地扩张,对区域生态系统造成巨大压力.在分析土地利用变化的基础上,评估 ESs 时空变化情况并探究其对城镇化的响应,能为优化土地管理和维护生态安全提供科学依据.

ESs 是生态学与地理学的研究热点,目前已从省[6]、市[7]、县[8]等多尺度开展研究,关注大流域、三角洲、城市群和国家公园等区域.在国外,研究主要集中在 ESs 评价与模拟(如 Mohammadyari 等[9])、土地利用对 ESs 的影响(如 Schirpke 等[10])和生态适宜性分析等方面(如 Franco 等[11]).在国内,研究主要集中在 ESs 时空变化(如朱春霞等[12]对黄河流域)、

**收稿日期**：2024-01-19
**基金项目**：国家重点研发计划课题(2022YFC3800203)
* 责任作者, 教授, wxr@bjfu.edu.cn

超星·期刊



生态系统服务价值(如 Huang 等[13]对珠江三角洲)、人为因素对 ESs 的影响(如 Liu 等[14]对鄱阳湖城市群)以及 ESs 分布的冷热点识别等方面(如李子辉等[15]对云南省).目前,研究方法主要有统计分析[16]、空间叠置[17]、模型模拟[18]等.常用的模型有 CASA[19]、RSEI[20]和 InVEST[21]模型等,其中 InVEST 模型因精度高、可视化和数据易获取,被广泛使用.InVEST 模型常用于多项 ESs 指标计算,其结果可进行权衡协同分析,例如李春莹等[22]对长江三角洲和杨强强等[23]对宁夏的研究.随着社会发展生态系统受到更多人类活动的影响,关于城镇化与 ESs 交互的研究主要集中在耦合协调[24]、供需关系[25]和动态响应[5]等方面.这些成果推动着研究进展,但在两方面还值得进一步补充.一是研究多集中于京津冀[5,26-27]等城市群,对北方山地城市的关注较少;二是多采用空间自相关[1,24,28]分析 ESs 分布情况,该方法能较好地呈现聚类特征却无法探究服务间的依存关系,为此生态系统服务簇(ESB)提供了新的定量视角.ESB 指一定时间和空间范围内具有相似组成结构的 ESs 集合[29-30],由 Kareiva[30]于 2007 年提出,常用于识别 ESs 主导功能与分析组成结构[31].

忻州市位于山西省中北部,山区和高原占总面积的 87%,是典型的北方山地城市.忻州市野生动植物资源丰富,境内已知植物 200 余种,野生动物 184 种,含国家一、二类保护动物 10 余种,其 ESs 对华北地区意义重大.近年来随着城镇化的推进,忻州市生态系统面临巨大压力,为此采取了退耕还林等众多生态保护与修复措施.然而由于对忻州市各项 ESs 评价与演变情况的研究相对匮乏,修复成效难以衡量,工作重心还需明确.目前已开展的生态廊道构建研究[32]是良好开端,但仍需全面评估 ESs 并考虑城镇化带来的影响,亟需开展较长时段的定量演化分析.基于此,本文以 1995~2020 年 6 期土地利用数据为基础,选取指标评估忻州市城镇化水平,借助 InVEST 模型与修正通用土壤流失方程等开展 ESs 评价,进而识别 ESB,分析各服务间权衡协同关系以及对城镇化的响应,以期为北方山地城市的生态保护与可持续发展提供依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

忻州市位于山西省中北部,北邻朔州,南接太原,西望陕蒙,东临京冀,现辖 1 区 1 市 12 县.地处黄土高原东端,东部群山迭起,西部丘陵遍布,沟壑纵横.属温带大陆性季风气候,因地形复杂区域间气候差异大;冬冷夏热,秋季降水多而集中.年平均气温 4.3~9.2℃,年降水量 345~588mm.境内有汾河、恢河与牧马河等河流,土壤类型丰富,主要有草甸土、棕壤、褐土和黄绵土等.忻定盆地为境内最大的盆地,约占全市土地面积的 10.5%,中心城区位于盆地南部.截至 2022 年末,忻州市常住人口 265.56 万人,地区 GDP 1500.6 亿元.

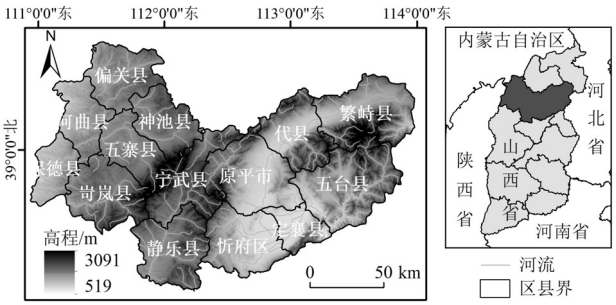



图 1 研究区忻州市

Fig.1 Research area Xinzhou City

### 1.2 数据来源

文中使用的 1995~2020 年 6 期土地利用数据来自武汉大学中国 1985~2022 逐年土地利用数据集(CLCD)[33],分辨率为 30m,该数据基于 Landsat 遥感影像,经人工目视解译,总体精度 80%.DEM 数据来自地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/) ASTER GDEM 30M 数据集.行政区划与河流水系等矢量数据来自全国地理信息资源目录服务系统(https://www.webmap.cn/).历年人口密度、GDP 密度和归一化植被指数(NDVI)等栅格数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/).年平均气温、年降雨量、夜间灯光数据和土壤可蚀性因子数据来自国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn/).以上数据经 ArcGIS 10.6 预处理,按 30m 分辨率重采样,统一坐标系为 WGS_1984_UTM_Zone_49N.粮食产量等社会经济数据来自忻州市统计公报.

### 1.3 研究方法

研究分为 5 步,首先分析土地利用时空变化,在此基础上选取 3 项城镇化指标与 4 项 ESs 指标,分别

超星·期刊



探究城镇化与 ESs 空间格局及变化,之后使用 K-均值聚类识别 ESB,最后运用皮尔逊相关性分析 ESs 权衡协同关系以及对城镇化的响应.

1.3.1　土地利用转移矩阵　转移矩阵通过计算不同时期各土地利用类型面积差值,反映土地的转入与转出情况[34],其公式为:

$$S_{ij}=\begin{Bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{Bmatrix} \tag{1}$$

式中:$i$ 为初期地类,$j$ 为末期地类;$S_{ij}$ 为土地利用类型由 $i$ 转为 $j$ 的面积;$n$ 为地类数.

1.3.2　城镇化指标　参照相关研究[5,24],从空间、经济和人口 3 个方面分别选取夜间灯光指数(NTL)、GDP 密度和人口密度评估忻州市城镇化水平,计算公式如下:

$$\mathrm{NTL}_x=\frac{\mathrm{NTL}_{x\mathrm{T}}}{A_x}\times 100\% \tag{2}$$

$$\mathrm{GDP}_x=\frac{\mathrm{GDP}_{x\mathrm{T}}}{A_x} \tag{3}$$

$$\mathrm{POP}_x=\frac{\mathrm{POP}_{x\mathrm{T}}}{A_x} \tag{4}$$

式中:$x$ 为计算区域(或栅格);$\mathrm{NTL}_x$、$\mathrm{GDP}_x$ 和 $\mathrm{POP}_x$ 分别为 $x$ 的夜间灯光指数、地区生产总值和人口密度,$\mathrm{NTL}_{x\mathrm{T}}$、$\mathrm{GDP}_{x\mathrm{T}}$ 和 $\mathrm{POP}_{x\mathrm{T}}$ 分别为 $x$ 的该指标总值;$A_x$ 为 $x$ 的面积.

1.3.3　生态系统服务评价　研究选取忻州市 4 项典型 ESs 指标,即食物供给(FP)、碳储量(CS)、生境质量(HQ)和土壤保持(SR),涵盖联合国千年生态系统评估中 3 类主要服务,FP 属供给服务,CS 属调节服务,HQ 和 SR 属支持服务.指标选取还综合考虑了忻州市属于贫困地区、应对气候变化的双碳目标、忻州市野生动植物资源丰富以及地处黄土高原水土流失严重等条件,以下详细介绍计算过程.

(1) 食物供给　研究表明,食物供给(FP)与归一化植被指数(NDVI)存在显著线性关系[21],因此可通过忻州市粮食产量与 NDVI 数据模拟食物供给的空间分布情况,计算公式为:

$$\mathrm{FP}_x=\frac{\mathrm{NDVI}_x}{\mathrm{NDVI}_{\mathrm{sum}}}\times \mathrm{FP}_{\mathrm{sum}} \tag{5}$$

式中:$x$ 为栅格;$\mathrm{FP}_x$ 为栅格 $x$ 的粮食产量;$\mathrm{FP}_{\mathrm{sum}}$ 为当年忻州市粮食总产量;$\mathrm{NDVI}_x$ 为栅格 $x$ 的归一化植被指数;$\mathrm{NDVI}_{\mathrm{sum}}$ 为忻州市各栅格归一化植被指数和.

(2) 碳储量　本文使用 InVEST 3.13.0 碳储量模块计算,其包含 4 个基本碳库,即地上生物碳、地下生物碳、土壤碳和死亡有机碳,通过土地利用类型估算碳储量,模型所需的碳密度值根据参考文献[5]设定,计算公式为:

$$C_x=C_{\mathrm{above}}+C_{\mathrm{below}}+C_{\mathrm{soil}}+C_{\mathrm{dead}} \tag{6}$$

式中:$C_x$ 为栅格 $x$ 的总碳储量,$C_{\mathrm{above}}$ 为地上碳储量,$C_{\mathrm{below}}$ 为地下碳储量,$C_{\mathrm{soil}}$ 为土壤碳储量,$C_{\mathrm{dead}}$ 为死亡有机碳储量.单位为万 t/km$^2$.

(3) 生境质量　使用 InVEST 模型生境质量模块计算忻州市生境质量.根据不同土地利用类型的生境适宜度考虑威胁因子与敏感性[5,35],其主要计算公式如下:

$$Q_{xj}=H_j\left[1-\left(\frac{D_{xj}^Z}{D_{xj}^Z+k^Z}\right)\right] \tag{7}$$

式中:$Q_{xj}$ 为地类 $j$ 栅格 $x$ 的生境质量;$H_j$ 为地类 $j$ 的生境适宜度;$Z$ 为归一化常数(默认值 2.5);$k$ 为半饱和常数(默认值 0.5);$D_{xj}$ 为地类 $j$ 栅格 $x$ 的生境退化度.

(4)土壤保持　采用修正通用土壤流失方程(RUSLE)计算土壤保持量[36],计算公式如下:

$$A_m=R\times K\times L\times S\times C\times P \tag{8}$$

$$A_p=R\times K\times L\times S \tag{9}$$

$$A_c=A_p-A_m \tag{10}$$

式中:$A_m$ 为实际土壤侵蚀量;$A_p$ 为潜在土壤侵蚀量;$A_c$ 为土壤保持量,t/km$^2$;$R$ 为降雨侵蚀因子;$K$ 为土壤可蚀性因子;$L$ 为坡长系数;$S$ 为坡度因素;$C$ 为植被覆盖和管理因子;$P$ 为保护支持实践因子.

1.3.4　K-均值聚类　采用 K-均值聚类进行 ESB 识别.K-均值聚类是一种非监督学习聚类法,常用于分类领域[29].使用 ArcGIS 10.6 创建渔网工具,建立 3km×3km 的评价单元,借助 SPSS 26.0 平台进行数据标准化并识别和划分 ESB,分析其组成结构、空间分布以及演化情况.计算公式如下:

$$d(x_i,x_j)=\left[\sum_{r=1}^{p}\left|x_{ir}-x_{jr}\right|^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{11}$$

$$C(l)=\arg\min_{1\leqslant l\leqslant K} d(x_i,v_l) \tag{12}$$

$$v_l=\arg\min_{v}\sum_{i\in C_l} d(x_i,v) \tag{13}$$

式中:$d(x_i,x_j)$ 为样本聚类时的欧氏距离;$x_i$ 为第 $i$ 个样本;$x_{ir}$ 为第 $i$ 个样本的第 $r$ 个特征参数;$C(l)$ 为聚类 $l$ 的样本集合;$v_l$ 为聚类 $l$ 的重心.重复上述过程迭代,

超星·期刊



至重心不再变化,获得聚类情况.

1.3.5 皮尔逊相关性 采用皮尔逊(Pearson)相关性进一步分析 ESs 权衡协同关系及其对城镇化的响应,并借助 Origin Pro 2022 制图.计算公式为:

$$p_{xy}=\frac{n\sum_{i=1}^{n}x_iy_i-\sum_{i=1}^{n}x_i\sum_{i=1}^{n}y_i}{\sqrt{n\sum_{i=1}^{n}x_i^2-(\sum_{i=1}^{n}x_i)^2}\sqrt{n\sum_{i=1}^{n}y_i^2-(\sum_{i=1}^{n}y_i)^2}} \tag{14}$$

式中:$p_{xy}$ 为变量 $x$ 与 $y$ 的相关性;$n$ 为变量取值数.$p_{xy}$ 取值范围为[−1,1],若 $p_{xy}$=0,则 $x$ 与 $y$ 无相关性;若 $p_{xy}$>0,则呈协同关系;若 $p_{xy}$<0,则呈权衡关系.$p_{xy}$ 的绝对值越大,相关性越强.

## 2 结果与分析

### 2.1 土地利用时空变化

忻州市土地利用类型以草地、耕地和林地为主,面积占比分别为 49.1%、27.2%和 21.2%.空间分布上,耕地主要分布在中部偏东的忻定盆地,西部丘陵山区也有耕地分布(图 2).林地主要分布在中部云中山和东部五台山支脉地区.草地分布广泛,在浅山区、山前平原与西部丘陵区与耕地相间分布.建设用地主要在盆地中呈团簇状分布,忻府区、定襄县、原平市、代县和繁峙县的建设用地以政府驻地为核心网状相连.水域面积较小,仅 42.4km$^2$,主要为汾河与牧马河等河道.

1995~2020 年忻州市建设用地扩张迅猛,面积从 313.5km$^2$ 增长到 594.2km$^2$,增量为 280.7km$^2$,涨幅达 89.5%(表 1).耕地和水域面积有一定减少,耕地减少 1989.3km$^2$,减幅 22.5%;水域减少 4.2km$^2$,减幅 9.0%.林地和草地面积增加,林地增加 1201.4km$^2$,增幅 29.0%;草地增加 511.4km$^2$,增幅 4.3%.有大量耕地向草地转移,也有相当数量的草地向林地转移,转移量分别为 2344.7 和 1141.2km$^2$.建设用地扩张的土地来源主要是耕地和草地,转移量分别为 231.2 和 41.8km$^2$.耕地减少主要发生在 2000~2010 年,建设用地扩张主要发生在 2005~2015 年,各时期林地面积都有一定增加.总体上,建设用地扩张明显,耕地持续减少但速率放缓,林地和草地有所增加.

**表 1 忻州市 1995~2020 年土地利用转移矩阵**

Table 1 Land use transfer matrix of Xinzhou City from 1995 to 2020

| 土地利用类型 (km$^2$) | | 2020 年 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 耕地 | 林地 | 草地 | 水域 | 建设用地 | 未利用地 | 合计 |
| 1995 年 | 耕地 | 6147.8 | 132.8 | 2344.7 | 3.7 | 231.2 | 0.3 | 8860.6 |
| | 林地 | 7.2 | 4071.0 | 62.2 | 0.0 | 3.3 | 0.0 | 4143.7 |
| | 草地 | 709.0 | 1141.2 | 9971.9 | 3.8 | 41.8 | 0.9 | 11868.5 |
| | 水域 | 6.9 | 0.2 | 0.6 | 33.7 | 5.1 | 0.0 | 46.6 |
| | 建设用地 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 1.1 | 312.2 | 0.0 | 313.5 |
| | 未利用地 | 0.2 | 0.0 | 0.5 | 0.0 | 0.6 | 0.1 | 1.4 |
| | 合计 | 6871.3 | 5345.1 | 12379.9 | 42.4 | 594.2 | 1.3 | 25234.3 |

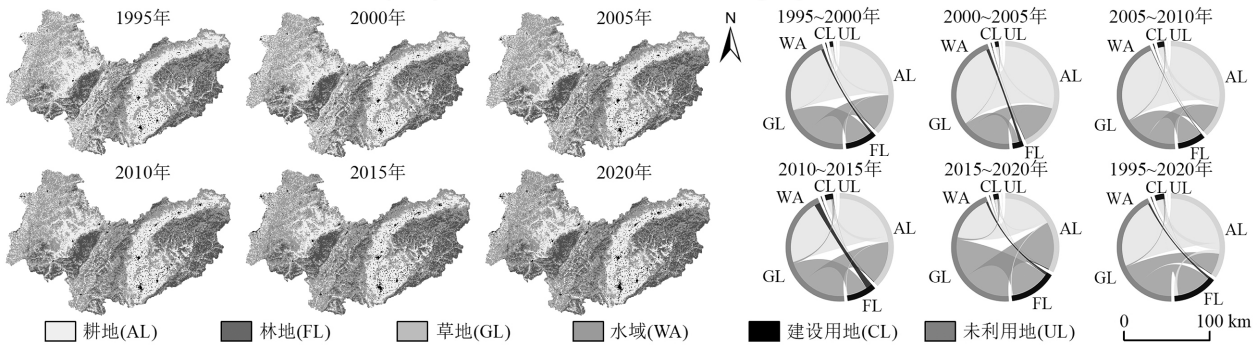



图 2 忻州市土地利用空间分布与转移

Fig.2 Spatial distribution and transfer of land use in Xinzhou City

### 2.2 城镇化指标空间格局及其变化

1995~2020 年忻州市经历了快速城镇化,在空间、经济和人口三方面均有体现(图 3).夜间灯光指数(NTL)的变化可从空间上反映城镇化,忻州市 NTL 从 1995 年的 0.784%上升到 2020 年的 3.673%,NTL 的分布从以鱼钩形的忻定盆地为主,向西部丘陵区的神池县、五寨县和岢岚县拓展.GDP 密度从 1995 年的 6.27 万元/km$^2$ 增长到 2020 年的 406.17 万元/km$^2$,且增长速率加快.其分布以南部忻府区为核心,2015 年以后西部保德县

超星·期刊



与河曲县 GDP 密度较高,这与以煤炭为主的采矿业迅猛发展有关.人口密度方面,总体呈波动上升趋势,从 1995 年的 111.21 人/km$^2$ 增长到 2020 年的 125.62 人/km$^2$,其中 2005 年的小幅波动考虑与计划生育政策和人口迁出有关.人口空间分布主要集中在忻府区,原平市政府驻地呈次级核心;忻府区人口密度在中心城区小幅下降,外围区域升高,呈现一定程度的郊区化.总体上,1995~2020 年忻州市城镇化水平明显提高,以忻府区为核心,东部发展快于西部.

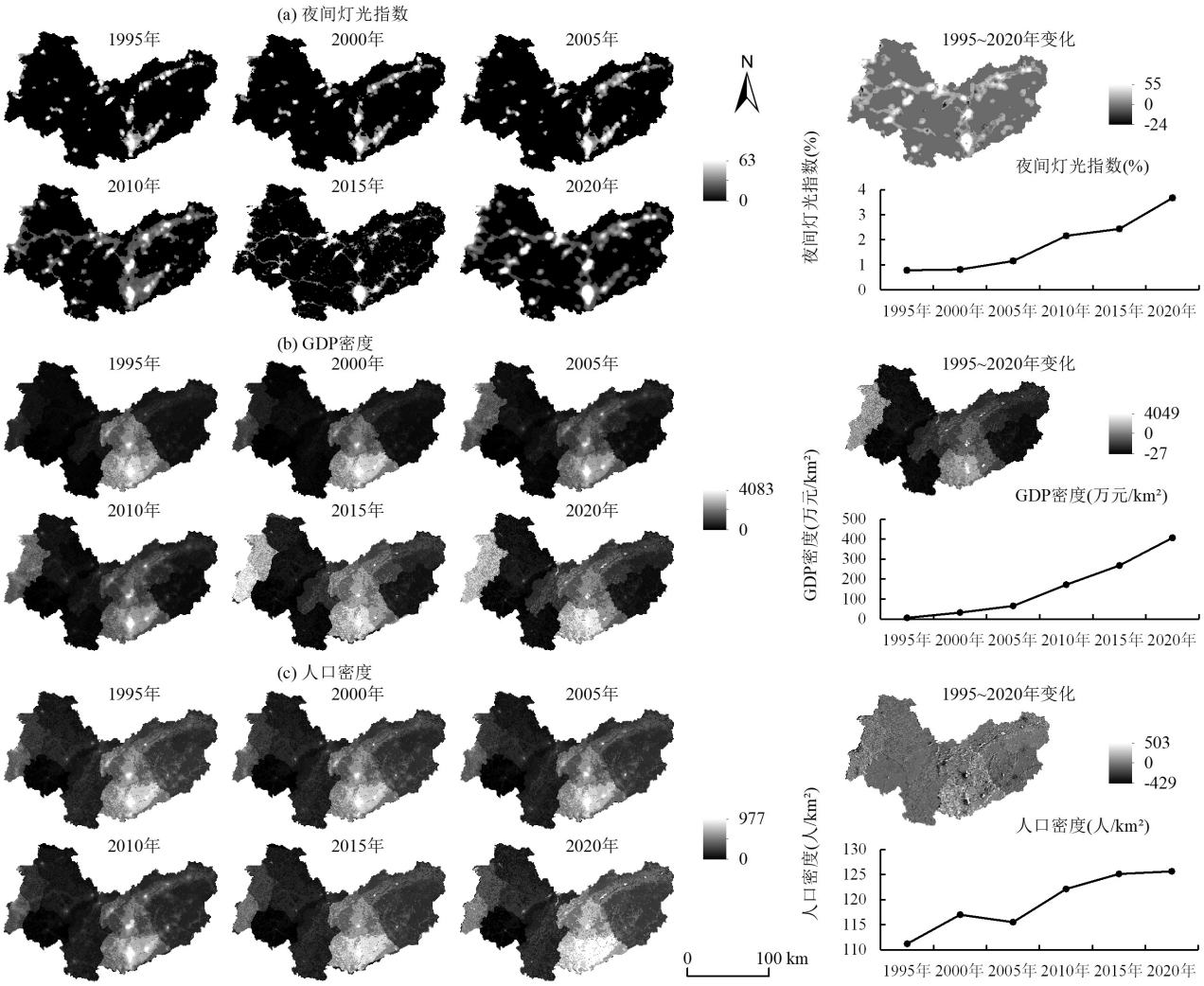



图 3　忻州市 1995~2020 年城镇化指标空间变化

Fig.3　Spatial changes in urbanization indicators in Xinzhou City from 1995 to 2020

## 2.3　生态系统服务空间格局及其变化

1995~2020 年忻州市 4 项 ESs 指标的空间分布与变化情况如图 4 所示.忻州市食物供给能力稳步提升,粮食产量从 84 万 t/a 提升至 195 万 t/a,其中 2015~2020 年增长速度明显提高.在空间分布上,绝大多数区域的粮食产量都有提升.

碳储量平均值从 1995 年的 2.697 万 t/km$^2$ 提升至 2020 年的 2.746 万 t/km$^2$,其中 2000~2005 年由于耕地面积减少碳储量有一定下降,之后 10a 保持在 2.68 万 t/km$^2$ 左右,2015 年以后碳储量明显提升考虑与林地面积增加有关.在空间分布上,忻定盆地耕地区和西部吕梁山余脉天然林区碳储量较高.

生境质量 1995~2010 年呈上升趋势,均值从 0.549 上升至 0.567,但 2010 年以后呈下降趋势,至 2020 年为 0.555.在空间分布上,东部五台山与西部云中山、马圈山的林区生境质量较高,忻定盆地较低.西部地区生境质量整体有所提升,但东部五台县和繁峙县山区生境质量退化明显.

土壤保持量整体呈先下降后波动上升趋势,均值从 1995 年的 1309t/km$^2$ 下降至 2005 年的 623t/km$^2$,

超星·期刊



之后2020年又波动回升至1207t/km$^2$.从分布图中可明显看出随着城镇建设与农业发展,忻定盆地1995~2005 年水土流失严重,2010 年后随着生态治理水土流失得到有效控制,整体上中西部广大地区土壤保持量均有一定提升,但东部五台山区呈局部下降.

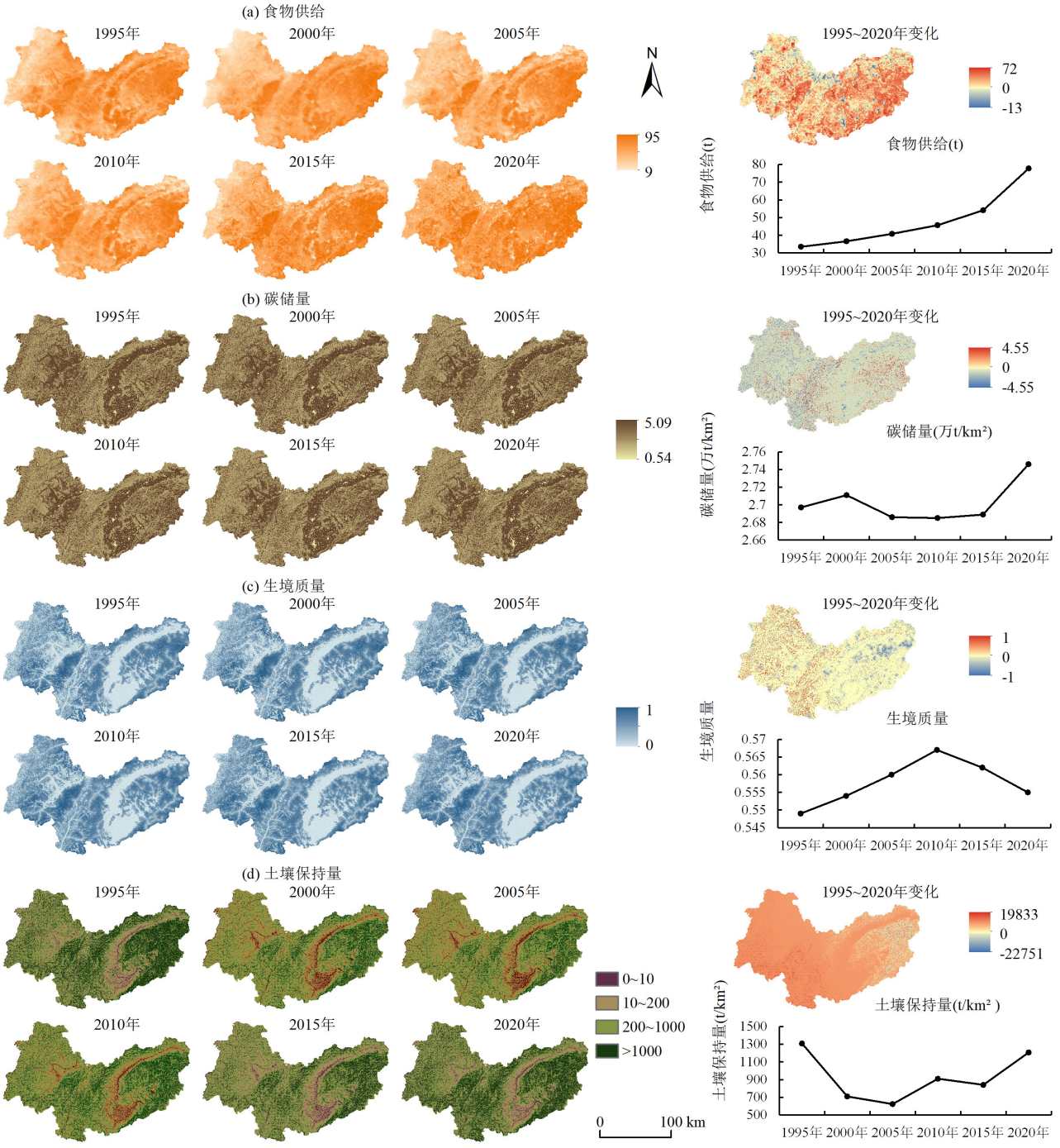



图 4 忻州市 1995~2020 年生态系统服务指标空间变化

Fig.4 Spatial changes in ecosystem service indicators in Xinzhou City from 1995 to 2020

## 2.4 生态系统服务簇识别

为探寻 ESB 特征与组成结构,使用 K-均值聚类识别 ESB (图 5).ESB1 以提供碳储量为主导,且分布区主要为林地,故划分为生态保育型;该服务簇主要分布在东部和中部山区,面积占比约为 20.3%,总体呈增加趋势.ESB2 具有较高食物供给功能兼具较大的碳储量,且分布区以农田为主,故划分为食物供给型;该服务簇主要分布在中部忻定盆地与吕梁山余

超星·期刊



脉西北丘陵地带,面积占比约为 28.3%,演化趋势呈先减少后增加,其中 2000~2005 年减少较明显.ESB3 具有多种服务功能,依次为土壤保持、生境质量、食物供给与碳储量,故划分为功能复合型,其分布区以高程适中的丘陵草地为主;该服务簇主要分布在云中山、马圈山以西的浅山与丘陵地带,面积占比约为 51.4%,是忻州市的主要服务簇,演化趋势呈先增加后减少.从服务簇的相互转移来看,2000~2005 年由食物供给型转向功能复合型的较多,2010 年后功能复合型转向生态保育型的较多.总体上,功能复合型服务簇为主体,食物供给型次之,生态保育型服务簇具有较大碳储量与良好的生境质量.

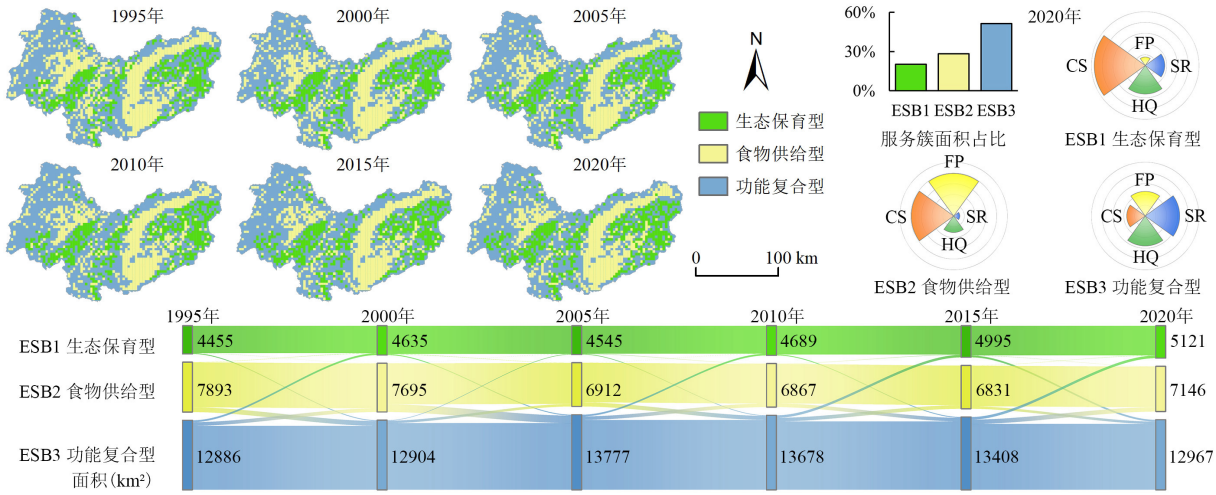



图 5　忻州市生态系统服务簇的分布、结构与演化

Fig.5　The distribution, structure, and evolution of ecosystem services bundles in Xinzhou City

## 2.5　生态系统服务权衡协同关系及城镇化响应

忻州市各项 ESs 主要呈协同关系(图 6).FP-CS 呈协同关系,SR 与其他 3 项 ESs 之间(FP-SR、CS-SR、HQ-SR)呈协同关系,可见土壤保持与其他生态系统服务协同性较好;HQ-FP 之间相关性不显著,HQ-CS 呈较弱的权衡关系,考虑是因为耕地的碳储量较大但对生境质量的贡献相比林地和草地有一定差距.3 项城镇化指标之间(GDP-NTL、POP-NTL、POP-GDP)呈显著正相关,说明忻州市城镇化分布情况在空间、经济和人口三方面高度一致.

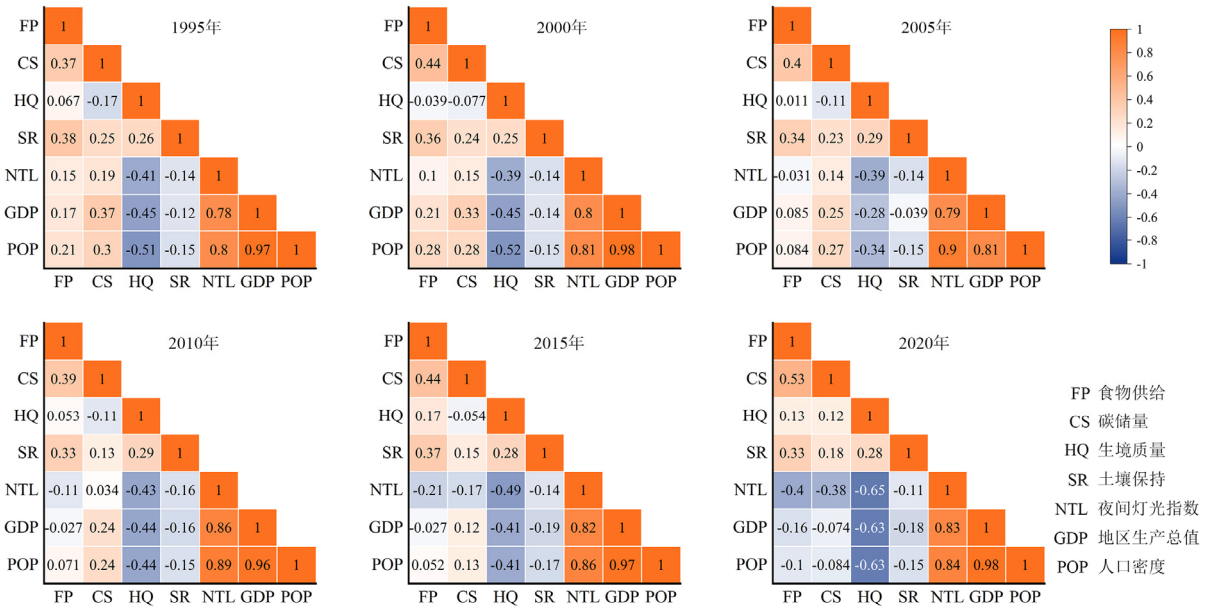



图 6　生态系统服务与城镇化指标的皮尔逊相关性

Fig.6　Pearson correlation between ecosystem services and urbanization indicators

超星·期刊



各年份生境质量与城镇化指标呈显著负相关,是因为城镇化(建设用地的扩张)对区域生境质量会造成一定负面影响,其计算具体数值与InVEST模型威胁因子设置有关.土壤保持与城镇化指标呈较弱的负相关,特别是受忻定盆地城镇建设和农业开发影响,区域土壤保持量较低.除2020年以外碳储量与城镇化指标呈正相关,食物供给与城镇化指标相关性不显著.生态系统服务与城镇化指标间最强正相关存在于1995年CS-GDP之间,而这种关系正在弱化,最强负相关存在于2020年HQ与NTL、GDP、POP之间.此外,随时间推移城镇化对生态系统服务的抑制作用逐渐增强.

## 3 讨论

土地利用变化显著影响区域ESs[3,36],快速城镇化带来建设用地扩张,人口、产业向中心城区及周边生态空间聚集,对环境产生巨大压力[5].随着城镇化的推进,不同地区ESs变化并不一致[5,24-25].夏楚瑜等[5]和凌云等[25]的研究显示京津冀地区碳储量下降,其他服务功能有所提升;田一聪等[24]发现西藏自治区ESs与城镇化存在显著负相关.本文的研究结果表明忻州市生境质量、土壤保持与城镇化呈负相关,这与朱春霞等[12]对黄河流域晋陕豫地区整体的研究结果一致,2005年后忻州土壤保持量波动上升,表明合理采取生态保护与修复措施有利于减轻城镇化对ESs的负面影响,特别是提高区域生境质量和土壤保持能力,这与刘珺等[37]对山西省汾河流域的研究结论一致;此外林地面积增加有利于碳储量的提升,在学界基本达成共识[38-39].1995~2020年忻州市建设用地扩张了280.7km$^2$,增长率高达89.5%;耕地面积减少明显,林地和草地有一定增加.这一方面与城镇开发侵占近郊农田有关,另一方面也受退耕还林还草等生态修复措施影响.虽然耕地有一定减少,但随着农业技术的进步忻州市粮食产量稳步提升,且增长速率加快.未来适当牺牲不适宜耕种的一般农田,推广科学高效的农业技术培育高产农田,继续开展生态保护措施是可持续发展的首选.

近年来忻州市实施了草原生态保护、高铁高速沿线环境综合整治、太行山生态保护与修复、汾河上游生态保护和高质量发展等众多生态战略,取得了明显成效.研究中1995~2010年生境质量和2005年以后土壤保持量都有明显提升,特别是对中部忻定盆地水土流失的治理可谓立竿见影.但东部繁峙县、五台县的五台山区生境质量和土壤保持量均呈下降趋势,未来还需重点关注.忻州作为北方典型山地城市,拥有丰富的天然林地和动植物资源,但西部黄土高原水土流失严重,应注重保护天然林地资源,坚守生态红线,在考虑区域水资源与蒸发量的情况下合理开展植树造林活动;作为以煤炭、铁矿开采为主的资源型城市,忻州对保障华北能源供给贡献突出,但自身面临转型和环境污染等问题,应采取矿区生态修复与补偿措施;作为贫困地区,增进民生福祉是工作核心,未来可考虑生态扶贫,培育长短期结合的绿色脱贫产业,开展生态旅游.

本文以6期土地利用数据为基础,选取3项城镇化指标与4项ESs指标,在较长时段内对忻州市城镇化水平与生态系统服务进行评估,分析其时空演变特征,并进一步识别ESB,探寻ESs权衡协同关系及其对城镇化的响应,能为华北山地城市的土地管理与生态保护提供依据,但也存在一定的局限性.在计算ESs指标时数据处理与中间过程可能会对结果产生一定影响,目前主要根据已有研究设置:碳储量计算中碳密度值采用参考文献[5]经验值,后续有条件可考虑采样测定,目前以反映时空变化趋势和空间分布相对情况为主;生境质量计算中威胁因子主要为建设用地和耕地,根据参考文献[5,30]设置最大影响距离、权重和衰减性以及各地类(一级类)生境适宜度和敏感性,未来可考虑细化土地利用类型并结合污染分布情况.文中采用的土地利用数据分辨率为30m,在城市尺度目前能满足需要,之后可选用更高分辨率的数据;城镇化指标分布栅格(人口和GDP)采用的是中国科学院资源环境科学与数据中心的分县统计1km空间差值数据,未来可尝试获取街道级更高精度的数据;根据忻州市特征选取4项ESs指标,之后可补充水质净化或景观美学等指标;皮尔逊相关性计算的精确数值受渔网密度、样本数量影响,但对指标的相对情况影响较小,未来可开展不同尺度的对比研究;文章关注1995~2020年的历史变化,后续可尝试开展多情景模拟等预测分析.

## 4 结论

4.1 忻州市土地利用类型以草地、耕地和林地为

超星·期刊



主,1995~2020 年建设用地扩张了 280.7km$^2$,耕地和水域面积减少,林地和草地分别增加 1201.4 和 511.4km$^2$.随着退耕还林还草的实施,有 2344.7km$^2$ 耕地向草地转移和 1141.2km$^2$ 草地向林地转移.

4.2　2005~2015 年忻州市经历了快速城镇化,建设用地扩张, GDP 和人口稳步增长.城镇化对区域生态环境产生一定压力,但生态保护措施能有效扭转负面影响.1995~2020 年食物供给能力不断提升,碳储量在 2015 年后提升明显,生境质量先升后降,水土保持量先降后升.2005 年后对忻定盆地的水土流失治理成效显著,但五台山地区的生境质量退化和水土流失形势依旧严峻.

4.3　以草地为主的功能复合型生态系统服务簇占主要地位,面积占比约为 51.4%;食物供给型服务簇面积先减后增,兼具固碳能力;生态保育型服务簇多分布于山区,面积持续增加.各生态系统服务间主要呈协同关系,生境质量、土壤保持与城镇化指标间存在负相关,随着时间推移城镇化对生态系统服务的抑制作用有一定增强.

**参考文献：**


[1] 赵先超,田一豆,张潇湘.长株潭城市群土地利用碳排放与生态系统服务价值时空关系分析 [J]. 水土保持学报, 2023,37(5):215−225.
Zhao X C, Tian Y D, Zhang X X. Spatio−temporal relationship between land use carbon emissions and ecosystem service value in Changzhutan urban agglomeration [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(5):215−225.

[2] Jiang W, Wu T, Fu B. The value of ecosystem services in China: A systematic review for twenty years [J]. Ecosystem Services, 2021,52.

[3] 曲　艺,丁建丽,包青岭,等.多情景模拟下的新疆生态系统服务价值评估 [J]. 环境科学与技术, 2023,46(4):195−204.
Qu Y, Ding J L, Bao Q L, et al. Valuation of ecosystem service value with multi−scenario simulation in Xinjiang [J]. Environmental Science & Technology, 2023,46(4):195−204.

[4] Zhao Q J, Shao J F. Evaluating the impact of simulated land use changes under multiple scenarios on ecosystem services in Ji'an, China [J]. Ecological Indicators, 2023,156:111040.

[5] 夏楚瑜,国　洨,赵　晶,等.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 [J]. 生态学报, 2023,43(7):2756−2769.
Xia C Y, Guo H, Zhao J, et al. Dynamic responses of ecosystem services to urbanization at multi−spatial scales in the Beijing−Tianjin−Hebei region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(7):2756−2769.

[6] Zhang Y L, Hu X J, Wei B J, et al. Spatiotemporal exploration of ecosystem service value, landscape ecological risk, and their interactive relationship in Hunan Province, Central−South China, over the past 30years [J]. Ecological Indicators, 2023,156.

[7] 李康玮,曾贤刚.煤炭资源型城市煤炭开发与生态系统服务协调发展演变及驱动机制——以淮南市为例 [J]. 水土保持研究, 2023, 30(3):460−469.
Li K W, Zeng X G. Coordinated development evolution and driving mechanism of coal development and ecosystem services in Huainan City [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(3):460−469.

[8] Jiang W J, Guo P P, Lin Z M, et al. Factors influencing the spatiotemporal variation in the value of ecosystem services in Anxi county [J]. Heliyon, 2023,9(8):e19182−e19182.

[9] Fatemeh M, Mohsen T, Ardavan Z, et al. Optimization land use based on multi−scenario simulation of ecosystem service for sustainable landscape planning in a mixed urban − Forest watershed [J]. Ecological Modelling, 2023,483:110440.

[10] Uta S, Erich T, Stefan B, et al. Past and future impacts of land−use changes on ecosystem services in Austria [J]. Journal of Environmental Management, 2023,345:118728.

[11] Luísa F, Manuela R M. Assessing the ecological suitability of land−use change. Lessons learned from a rural marginal area in southeast Portugal [J]. Land Use Policy, 2022,122:106381.

[12] 朱春霞,钟绍卓,龙　宇,等.黄河流域生态系统服务的时空演变及其驱动力 [J]. 生态学杂志, 2023,42(10):2502−2513.
Zhu C X, Zhong S Z, Long Y, et al. Spatiotemporal variation of ecosystem services and their drivers in the Yellow River Basin, China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023,42(10):2502−2513.

[13] Huang Z N, Chen Y B, Zheng Z H, et al. Spatiotemporal coupling analysis between human footprint and ecosystem service value in the highly urbanized Pearl River Delta urban Agglomeration, China [J]. Ecological Indicators, 2023,148.

[14] Liu C H, Liu Y B, Giannetti B F, et al. Spatiotemporal differentiation and mechanism of anthropogenic factors affecting ecosystem service value in the Urban Agglomeration around Poyang Lake, China [J]. Ecological Indicators, 2023,154.

[15] 李子辉,张　亚,巴　永,等.云南省植被固碳能力与产水、土壤保持服务冷热点识别 [J]. 中国环境科学, 2024,44(2):1007−1019.
Li Z H, Zhang Y, Ba Y, et al. Cold and hot spots identification for carbon sequestration capacity, water yield and soil conservation services of vegetation in Yunnan Province [J]. China Environmental Science, 2024,44(2):1007−1019.

[16] Zuo L Y, Cao J B, Du F J. The pairwise interaction of environmental factors for ecosystem services relationships in karst ecological priority protection and key restoration areas [J]. Ecological Indicators, 2021,131:108125.

[17] Zhou S Y, Li W, Lu Z Y, et al. An ecosystem−based analysis of urban sustainability by integrating ecosystem service bundles and socio−economic−environmental conditions in China. Ecological Indicators, 2020,117:106691.

[18] Zhao J, Shao Z, Xia C Y, et al. Ecosystem services assessment based on land use simulation: A case study in the Heihe River Basin, China [J]. Ecological Indicators, 2022,143:109402.

[19] 何　颖,马松梅,张　林,等.玛纳斯河流域 NPP 时空变化及其生物多样性维护功能重要性评价 [J]. 生态学报, 2023,43(11):4664−4673.
He Y, Ma S M, Zhang L, et al. Spatio−temporal change of net primary productivity and the evaluatation of the importance of biodiversity maintenance functions in Manas River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(11):4664−4673.

[20] 康帅直,穆　琪,赵永华,等.黄土高原神府资源开采区生态环境质量时空格局特征 [J]. 生态学报, 2023,43(7):2781−2792.
Kang S Z, Mu Q, Zhao Y H, et al. Temporal and spatial pattern characteristics of ecological environmental quality in Shenfu mining

超星·期刊



area of Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(7):2781-2792.

[21] 陈俊辰,贺淑钰,薛 晶,等.多尺度生态系统服务的权衡关系及其对景观配置的响应——以湖北省为例 [J]. 生态学报, 2023,43(12):4835-4846.
Chen J C, He S Y, Xue J, et al. Exploring ecosystem service trade-offs and their response to landscape configuration at multi-scales: a case study of Hubei Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(12):4835-4846.

[22] 李春莹,李桂娥,李 杰,等.长江三角洲城市群生态系统服务协同权衡的时空异质性 [J]. 中国环境科学, 2024,44(2):992-1006.
Li C Y, Li G E, Li J, et al. Trade-offs and synergies of ecosystem services in Yangtze River delta urban agglomeration: A spatiotemporally heterogeneous analysis approach [J]. China Environmental Science, 2024,44(2):992-1006.

[23] 杨强强,章 翩,邱小琮,等.宁夏回族自治区生态系统服务时空变化及其权衡研究 [J]. 中国环境科学, 2023,43(10):5453-5465.
Yang Q Q, Zhang P, Qiu X C, et al. Spatiotemporal changes and trade-off analysis of ecosystem services in Ningxia Hui Autonomous Region [J]. China Environmental Science, 2023,43(10):5453-5465.

[24] 田一聪,田 明,李 鹏,等.西藏自治区城镇化与生态系统服务协调发展研究 [J]. 地理科学进展, 2023,42(10):1947-1960.
Tian Y C, Tian M, Li P, et al. Coordinated development of urbanization and ecosystem services in Tibet Autonomous Region [J]. Progress in Geography, 2023,42(10):1947-1960.

[25] 凌 云,杨宜男,许迦龙,等.京津冀地区城市化对典型生态系统服务供需关系的影响 [J]. 生态学报, 2023,43(13):5289-5304.
Ling Y, Yang Y N, Xu J L, et al. Impacts of urbanization on the supply and demand relationship of typical ecosystem services in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(13):5289-5304.

[26] 段维利,余新晓,陈丽华,等.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 [J]. 水土保持研究, 2023,30(4):404-411.
Duan W L, Xu X X, Chen L H, et al. Impact of urbanization and ecological construction on the ecosystem services value in the Beijing Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(4):404-411.

[27] 任胤铭,刘小平,许晓聪,等.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 [J]. 生态学报, 2023,43(11):4473-4487.
Ren Y M, Liu X P, Xu X C, et al. Multi-scenario simulation of land use change and its impact on ecosystem services in Beijing-Tianjin-Hebei region based on the FLUS-InVEST Model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(11):4473-4487.

[28] 王晓峰,尧文洁,冯晓明,等.青藏高原生态系统服务供需变化及其驱动因素 [J]. 生态学报, 2023,43(17):6968-6982.
Wang X F, Yao W J, Feng X M, et al. Changes and driving factors of ecosystem services supply and demand on the Tibetan plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(17):6968-6982.

[29] 彭 立,邓 伟,黄 佩,等.四川盆地多重生态系统服务景观指数评价与服务簇识别 [J]. 生态学报, 2021,41(23):9328-9340.
Peng L, Deng W, Huang P, et al. Evaluation of multiple ecosystem services landscape index and identification of ecosystem services bundles in Sichuan Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(23):9328-9340.

[30] Kareiva P, Watts S, McDonald R, et al. Domesticated nature: Shaping landscapes and ecosystems for human welfare [J]. Science, 2007, 316(5833):1866-1869.

[31] Raudsepp H C, Peterson G D, Bennett E M. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010,107(11):5242-5247.

[32] 张纹嘉,付勇勇,王晓军.基于生态系统服务价值评价的忻州市生态安全格局构建 [J]. 水土保持研究, 2023,30(4):355-364.
Zhang W J, Fu Y Y, Wang X J. Construction of ecological security pattern in Xinzhou City based on evaluation of ecosystem service value [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(4):355-364.

[33] Yang J, Huang X. The 30m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8):3907-3925.

[34] 赵庆建,吴晓珍.基于 InVEST 模型的岷江流域土地利用变化对生境质量的影响研究 [J]. 生态科学, 2022,41(6):1-10.
Zhao Q J, Wu X Z. Research on the impact of land use change on habitat quality in Minjiang river basin based on InVEST Model [J]. Ecological Science, 2022,41(6):1-10.

[35] 赵博轩,李淑杰,马 剑,等.基于 InVEST 模型的吉林省生境质量评价 [J]. 东北师大学报(自然科学版), 2022,54(2):132-141.
Zhao B X, Li S J, Ma J, et al. Evaluation of habitat quality in Jilin Province based on InVEST model [J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2022,54(2):132-141.

[36] 王 琳,卫 伟.黄土高原典型县域生态系统服务变化特征及驱动因素 [J]. 生态环境学报, 2023,32(6):1140-1148.
Wang L, Wei W. Characteristics and driving factors of ecosystem services changes in a typical county of the Loess Plateau [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023,32(6):1140-1148.

[37] 刘 珺,俞博云,杨文府.多尺度地理加权回归模型支持下的汾河流域生态系统服务关系演化机理研究 [J]. 遥感学报, 2023,27(7):1667-1679.
Liu J, Yu B Y, Yang W F. Evolution mechanism of ecosystem service relationship in the Fenhe River Basin based on multiscale geographically weighted regression [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023,27(7):1667-1679.

[38] 曹鹏辉,齐晓明,杨 雯,等.内蒙古土地利用多情景模拟与碳储量预测分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2023,37(9):83-90.
Cao P H, Qi X M, Yang W, et al. Multi scenario simulation and prediction of carbon storage for land use types in Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023,37(9):83-90.

[39] 孙欣欣,薛建辉,董丽娜.基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的南京市生态系统碳储量时空变化与预测 [J]. 生态与农村环境学报, 2023,39(1):41-51.
Sun X X, Xue J H, Dong L N. Spatiotemporal change and prediction of carbon storage in Nanjing ecosystem based on PLUS model and InVEST model [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023, 39(1):41-51.

**致谢：**感谢国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)提供数据支撑.

**作者简介：**解铭威(1997-),男,内蒙古鄂尔多斯人,北京林业大学博士研究生,研究方向为生态系统服务.发表论文 10 余篇.2720948576@qq.com.