

DOI: 10.20103/j.stxb.202207222100

乐荣武, 李巍, 周思杨, 宋南奇. 呼包鄂榆城市群生态系统服务价值驱动因素及其交互效应. 生态学报, 2023, 43(23): 9967-9980.

Yue R W, Li W, Zhou S Y, Song N Q. Driving factors and their interaction effects of ecosystem service value in the Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin urban agglomeration. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(23): 9967-9980.

# 呼包鄂榆城市群生态系统服务价值驱动因素及其交互效应

乐荣武<sup>1</sup>, 李 巍<sup>1,\*</sup>, 周思杨<sup>2</sup>, 宋南奇<sup>1</sup>

1 北京师范大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875

2 交通运输部水运科学研究院, 北京 100088

**摘要:** 增强呼包鄂榆城市群生态系统服务功能, 对于推动黄河流域生态保护和高质量发展具有重要意义。基于研究区 1990—2020 年土地利用类型评价了生态系统服务价值 (ESV), 耦合随机森林模型与沙普利加性解释 (SHAP) 方法分析 ESV 驱动因素的重要程度、变化响应特征及其交互效应, 采用偏最小二乘路径模型识别驱动因素的交互路径。结果表明: (1) 研究期内耕地、草地和水域面积整体呈先增后减趋势, 建设用地面积持续增加; ESV 呈先减后增趋势且总体增加了 62.28 亿元, ESV 的增长主要是林地向耕地和草地扩张的结果。(2) 最主要的 ESV 驱动因素为土地利用类型, 其贡献度达到 61.24%, 其次是地形和气象, 贡献度分别为 17.59% 和 17.05%, 社会经济的贡献度最低, 仅为 1.73%; ESV 对驱动因素的响应呈非线性变化特征。(3) 水域比例是最重要的交互项, 交互作用在因素处于不同范围内表现出不同的交互效应。土地利用直接影响 ESV, 而地形、气象、土壤和社会经济因素主要通过影响土地利用进而间接影响 ESV, 社会经济因素对 ESV 的直接和间接影响分别是负和正效应。研究建议通过完善城市群国土空间规划, 重点加强草地、林地和水域等生态空间保护并协调好与城镇建设、矿产资源开发的关系, 以提升生态系统服务功能为导向实施区域生态系统多因素协同管控。

**关键词:** 生态系统服务价值; 土地利用; 驱动因素; 呼包鄂榆城市群; 交互效应

## Driving factors and their interaction effects of ecosystem service value in the Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin urban agglomeration

YUE Rongwu<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1,\*</sup>, ZHOU Siyang<sup>2</sup>, SONG Nanqi<sup>1</sup>

1 State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 China Waterborne Transport Research Institute, Beijing 100088, China

**Abstract:** The enhancement of ecosystem function within the Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin urban agglomeration is significant for advancing ecological protection and promoting high-quality development in the Yellow River basin. Ecosystem service value (ESV) was evaluated based on the land use types in the study area from 1990 to 2020, the random forest model coupled with the SHAP method were used to analyze the importance, response, and interaction of the driving factors, and partial least squares path modeling was used to identify interaction paths of the driving factors. The results showed that (1) the area of cropland, grassland, and water exhibited an initial increase followed by a decrease, while the construction land area continued to increase. The ESV underwent an initial decline, followed by an increase of 62.28 billion yuan, primarily due to the conversion of cropland and grassland to forest. (2) Land use was the most important driving factor of ESV change, with a 61.24% contribution rate. Natural factors, including topography and meteorology, were the next significant

基金项目: 国家自然科学基金项目 (72050001)

收稿日期: 2022-07-22; 网络出版日期: 2023-08-15

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: weili@bnu.edu.cn

contributors, with 17.59% and 17.05% contribution rates, respectively. Socio-economics factors had the least impact on ESV, with only 1.73% contribution rate. The responses of ESV to driving factors were characterized by nonlinear changes. (3) The proportion of water was the most important interaction factor, and the interaction between driving factors showed different effects when the driving factors were in different ranges. Topography, meteorology, soil, and socio-economics indirectly influenced ESV by affecting land use. The direct effects of socio-economics on ESV were negative, while its indirect effects were positive. It recommended to strengthen the protection of grassland, forest, water, and other ecological spaces and further to coordinate their relationship with urban construction and mineral resource development. Furthermore, the implementation of multi-factor collaborative management and control of regional ecosystems was oriented towards improving service functions.

**Key Words:** ecosystem service value; land use; driving factors; Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin urban agglomeration; interaction effects

生态系统服务(ES)被广泛定义为直接或间接促进可持续人类福祉的生态特征、功能或过程<sup>[1-2]</sup>。生态系统服务价值(ESV)是人类直接或间接地从生态系统功能中获得的有形或无形的利益的客观体现,是区域生态文明与可持续发展的重要表征<sup>[3]</sup>。ESV的空间格局和演变受到自然和社会经济等多方面驱动因素的影响<sup>[4]</sup>,而且各驱动因素通过直接或间接途径产生复杂的相互作用关系。因此,识别ESV多个驱动因素的交互效应,对于区域人类活动协同管控和系统提升区域生态系统服务功能具有重要意义<sup>[5]</sup>。

当前,对ESV的研究逐渐从ESV的评价和分析其时空变化转向到分析驱动机制。要摸清ESV的驱动机制,必须识别ESV的驱动因素并探究其交互作用关系<sup>[6-7]</sup>。探究ESV驱动因素常用的方法包括冗余分析<sup>[8-9]</sup>、相关性分析<sup>[10]</sup>、主成分分析<sup>[11-12]</sup>、逐步回归<sup>[13]</sup>和Logistic回归<sup>[14]</sup>等传统统计分析方法,这些方法仅能识别驱动因素的作用大小和方向,无法识别多个驱动因素之间的交互作用。有较多的研究使用地理探测器模型探究ESV的主导驱动因素及各驱动因素的交互作用<sup>[15-18]</sup>,虽然地理探测器可以对ESV驱动因素进行非线性归因且能识别驱动因素之间的交互作用,但不能判断驱动因素的作用方向,也无法刻画ESV对各驱动因素的变化响应特征<sup>[19-20]</sup>。地理探测器对驱动因素的数据要求转化为类型数据,该处理方法涉及可变面元问题增加了研究结果的不确定性<sup>[21-22]</sup>。在交互路径识别方面,已有学者使用结构方程模型对驱动因素间的作用路径进行定量测度<sup>[23-27]</sup>,但这类研究仍然较少,有待进一步探究。总之,当前的研究方法尚未系统全面分析ESV驱动因素的重要性、作用方向、交互作用和刻画ESV对驱动因素的变化响应特征。如何系统性揭示ESV变化的驱动机制,是当前亟需解决的问题。近年来,机器学习模型因其可以很好地表征驱动因素与ESV之间的非线性关系而被大量用于ESV的驱动分析<sup>[28-30]</sup>。然而,机器学习模型的大多数算法都被视为黑箱模型,并不能充分解释驱动作用机制。沙普利加性解释(SHAP)方法是近期开发的机器学习模型解释工具,不仅可以衡量驱动因素的贡献大小,还能识别驱动因素的影响方向及交互效应<sup>[31-32]</sup>,但将其用于ESV驱动作用机制的研究尚未见到。因此,将SHAP方法用于探索ESV驱动因素的交互作用机制方面具有较大的应用潜力。

呼包鄂榆城市群作为我国典型的快速城市化地区,是黄河流域人口、生产力布局的主要载体。城市群地处农牧交错带,生态本底脆弱,资源开采、城市用地扩张等导致生态用地破碎化,生态系统极易受到破坏。本研究重点关注ESV变化与土地利用类型转移模式之间的关系,探索ESV驱动因素交互作用的潜在机制。具体研究内容为:(1)分析研究期间土地利用和ESV的动态演变;(2)耦合随机森林模型与SHAP方法分析ESV驱动因素的重要程度、变化响应特征及其交互效应;(3)采用偏最小二乘路径模型识别驱动因素的交互路径。本研究系统性探究了呼包鄂榆城市群ESV驱动因素的交互作用机制,以期为黄河流域生态保护和高质量发展提供科学参考。

### 1 研究区概况与数据来源

#### 1.1 研究区概况

呼包鄂榆城市群是以内蒙古自治区呼和浩特市、包头市、鄂尔多斯市和陕西省榆林市组成的国家级城市群<sup>[33]</sup>。该地区国土面积约 17.5 万 km<sup>2</sup>,位于我国中西部的干旱半干旱区,土地利用以草地为主,约占总面积的 54%(图 1)。2020 年总人口约 1197 万人,平均海拔约 1300 m,年均气温约 8℃,年均降水约 320 mm。该区域是我国重要的能源、煤化工基地、农牧产品加工业基地和稀土新材料产业基地,也是黄河流域经济发展的重要增长极。

#### 1.2 数据来源

研究使用的主要数据和来源包括:①土地利用类型数据、行政边界矢量数据、气温、降水、潜在蒸散发、国内生产总值(GDP)格网和人口密度格网数据来源于中国科学院资源与环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>),空间分辨率均为 1 km,将土地利用类型重分类分为 6 个一级类,分别为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地;②高程数据从地理空间数据云(<https://www.gscloud/>)获取,空间分辨率为 90 m,在 ArcGIS 中使用分析工具计算坡度;③植被净初级生产力(NPP)数据从美国国家航空航天局(<https://www.nasa.gov/>)获取,空间分辨率为 500 m;④土壤属性数据从国家地球系统科学数据共享服务平台(<http://www.geodata.cn/>)获取,空间分辨率为 1 km,土壤保持量数据通过通用土壤流失方程(ULSE)进行计算;⑤其他社会经济数据来自《全国农产品成本收益资料汇编》《呼和浩特市统计年鉴》《包头市统计年鉴》《鄂尔多斯市统计年鉴》《榆林市统计年鉴》等。将所有空间数据统一到同一坐标系,并重采样至 1 km。本研究的 ESV 时空分析部分均在 1 km 的栅格尺度上进行,综合权衡数据分析精度和模型计算效率,以 5 km×5 km 的格网为基本单元,将研究区划分为 6817 个格网,在每个格网内统计所有变量的均值,用于本研究的驱动因素分析部分。

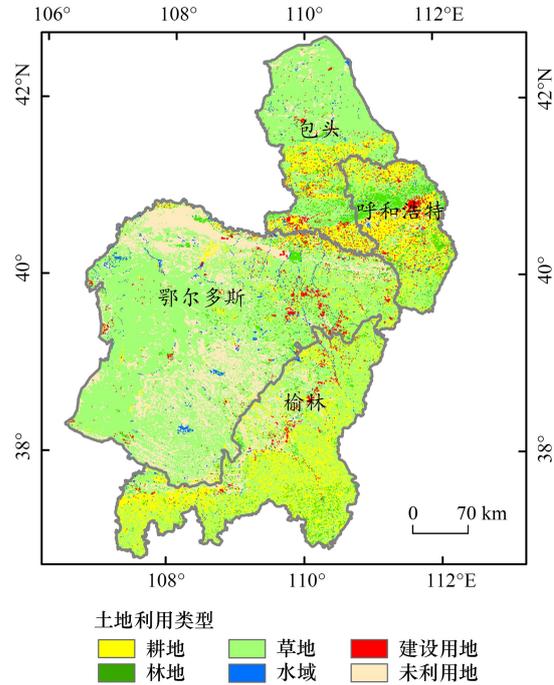


图 1 研究区土地利用类型分布

Fig.1 Land use types of the study area

### 2 研究方法

#### 2.1 生态系统服务价值核算

基于谢高地等的研究<sup>[34]</sup>,1 个标准单位 ESV 当量因子是指 1 hm<sup>2</sup>当年平均产量的农田自然粮食产量经济价值的 1/7。粮食产量价值主要依据稻谷、小麦和玉米进行计算,本文以研究区 2015 年的物价水平为基准,计算出研究区主要农作物平均单产价值,最终得到研究区 1 个标准当量经修正后的价值量为 1463.69 元/hm<sup>2</sup>(表 1)。

由于研究区不同年份、不同区域的生态系统的基本情况是变化的,ESV 也相应发生动态变化。本文参考谢高地等的研究<sup>[34]</sup>,认为生态系统食物生产、原材料生产、气体调节、气候调节、净化环境、维持养分循环、生物多样性和美学景观功能与生物量在总体上呈正相关,水资源供给和水文调节与降水变化相关,而土壤保持与降水、地形坡度、土壤性质和植被盖度密切相关。故选取 NPP、降水量和土壤保持量三项因子对当量进行动态调节,以此构建生态服务时空动态价值当量表,计算公式为:

表 1 不同土地利用类型单位面积价值系数/(元/hm<sup>2</sup>)

Table 1 Value coefficient per unit area of different land use types

生态系统服务 Ecosystem services	耕地 Cropland	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Water	未利用地 Unused land
食物生产 Food production	1463.69	424.47	351.29	1170.95	7.32
原料生产 Raw material	358.6	966.04	512.29	336.65	21.96
水资源供给 Water supply	29.27	497.65	285.42	12133.99	14.64
气体调节 Gas regulation	1302.68	3176.21	1814.98	1127.04	95.14
气候调节 Climate regulation	680.62	9513.99	4793.58	3351.85	73.18
净化环境 Waste disposition	197.6	2824.92	1580.79	8123.48	300.06
水文调节 Hydrological regulation	2188.22	6937.89	3512.86	149647.67	175.64
土壤保持 Soil conservation	761.12	3878.78	2210.17	1361.23	109.78
维持养分循环 Nutrient cycling	226.87	292.74	168.32	102.46	7.32
生物多样性 Biodiversity	248.83	3527.49	2005.26	3732.41	102.46
美学景观 Esthetical scenery	109.78	1551.51	885.53	2766.37	43.91

$$F_{nij} = \begin{cases} P_{ij} \times F_{n1} \\ R_{ij} \times F_{n2} \\ S_{ij} \times F_{n3} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $F_{nij}$ 指某种生态系统在第  $i$  年第  $j$  地区第  $n$  类生态服务功能的单位面积价值当量因子;  $F_n$ 指该类生态系统的第  $n$  种生态服务价值当量因子;  $n1$  表示与 NPP 相关的服务功能;  $n2$  表示与降水相关的服务功能;  $n3$  指土壤保持服务功能,  $P_{ij}$ 指 NPP 时空调节系数,  $R_{ij}$ 指降水时空调节系数,  $S_{ij}$ 指土壤保持时空调节系数。

研究区 ESV 计算公式为:

$$E = \sum_{c=1}^n E_c \quad (2)$$

$$E_c = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m D \times F_{nij} \times A_{ij} \quad (3)$$

式中,  $c$  为第  $c$  种生态系统服务功能;  $E_c$  为第  $c$  种生态系统服务功能价值;  $F_{nij}$  表示某种生态系统在第  $i$  年第  $j$  地区第  $n$  类生态服务功能的单位面积价值当量因子;  $D$  为多年的 1 个标准当量因子的生态系统服务平均价值量(元/hm<sup>2</sup>), 此处为 1463.69 元/hm<sup>2</sup>;  $A_{ij}$  为第  $i$  年第  $j$  地区的面积。

### 2.2 生态系统服务价值变化趋势分析

运用一元线性回归方程拟合 1990—2020 年 ESV 的时空演变特征,  $I_{ESV}$  表征每个栅格 ESV 线性变化斜率值, 若  $I_{ESV} > 0$ , 则表明 ESV 有改善趋势; 反之则表示存在退化趋势。采用  $F$  检验 ESV 变化趋势的显著性。结合  $I_{ESV}$  及  $F$  检验结果, ESV 变化趋势可分为 5 类: 大幅改善 ( $I_{ESV} > 0, P < 0.01$ ), 一般改善 ( $I_{ESV} > 0, P < 0.05$ ), 变化不显著 ( $P \geq 0.05$ ), 一般退化 ( $I_{ESV} < 0, P < 0.05$ ) 和大幅退化 ( $I_{ESV} < 0, P < 0.01$ )<sup>[35]</sup>。

### 2.3 随机森林模型与 SHAP 方法

本研究使用机器学习中的随机森林模型分析 ESV 的驱动因素<sup>[36]</sup>, 耦合 SHAP 方法对随机森林模型进行解释。随机森林相对于传统统计模型在进行预测时往往有更好的精度, 但是同时也失去了统计模型的可解释性, 所以随机森林通常被认为是黑箱模型。针对基于树的机器学习模型, 2017 年 Lundberg 和 Lee 提出了 SHAP 方法用来解释各种黑箱模型<sup>[37]</sup>。与以往研究中多采用线性拟合相关的方法或地理探测器模型量化 ESV 的驱动因素且无法排除驱动因素间的相互干扰相比, 耦合随机森林模型与 SHAP 方法不仅可以识别 ESV 和驱动因素的非线性关系, 还能够分离出每个驱动因素对 ESV 的独立影响以及各个因素间的交互影响。

将 GDP 密度、人口密度、降水、气温、潜在蒸散发、高程、坡度、土壤容重、黏土含量 9 种空间变量(图 2)以及 6 种土地类型面积比例共 15 个驱动因素作为随机森林模型的输入变量, 将 ESV 作为模型的输出变量, 模型样本量为 6817 个。

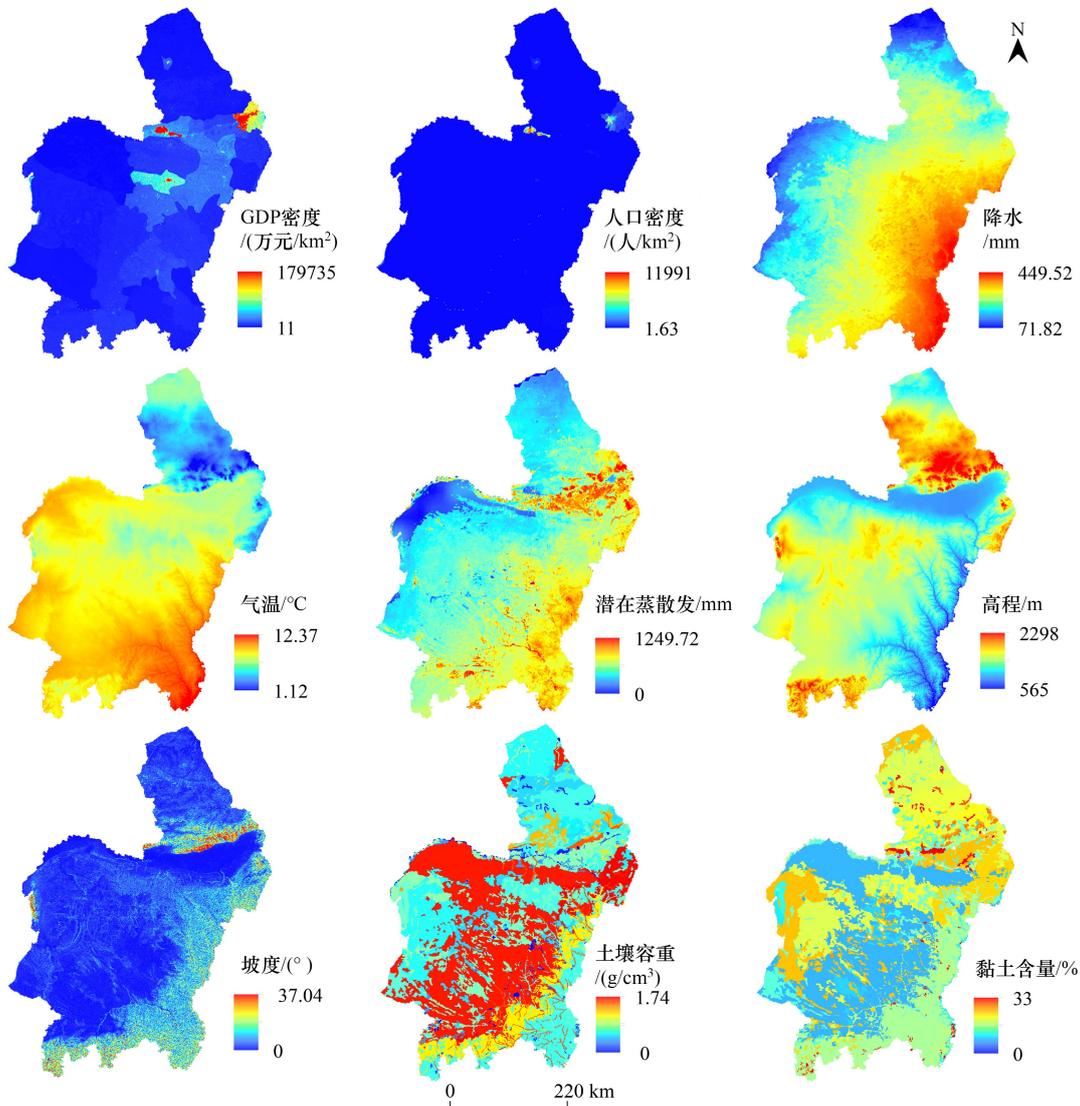


图 2 驱动因素的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of driving factors

GDP: 国内生产总值 Gross domestic product

### 2.4 偏最小二乘路径模型

偏最小二乘路径模型 (PLSPM) 是一种分析多变量间复杂因果关系的综合分析模型,属于结构方程模型的一种方法。该模型不仅能解决变量间存在的共线性问题,对变量的分布状态无要求,还可以计算不同变量对响应变量的直接效应和间接效应<sup>[38]</sup>。模型中路径系数反映了变量之间关系的方向和强度,而预测变量和响应变量之间相乘的路径系数则显示出间接影响的强度。拟合度指数 (GOF) 用于评估模型的预测性能,数值越大,模型预测效果越好。本研究使用偏最小二乘路径模型识别气象、地形、土壤、土地利用和社会经济因素对 ESV 的交互影响作用路径。

## 3 结果与分析

### 3.1 土地利用类型演变

在 1990—2020 年间,耕地面积整体呈现下降趋势,在 1995 年面积达到峰值后逐渐下降,损失的耕地主要

转化为草地(33.95%)和林地(5.12%)。林地面积在 1995 年达到最低值后逐渐上升,林地增加的主要原因是来自草地(35.03%)和耕地(19.21%)的转化。草地面积变化剧烈,草地与耕地和未利用地存在较大比例地互相转化;水域呈现先减后增的趋势;建设用地持续增加,主要来自于草地(40.11%)和耕地(28.89%)的转化(图 3)。

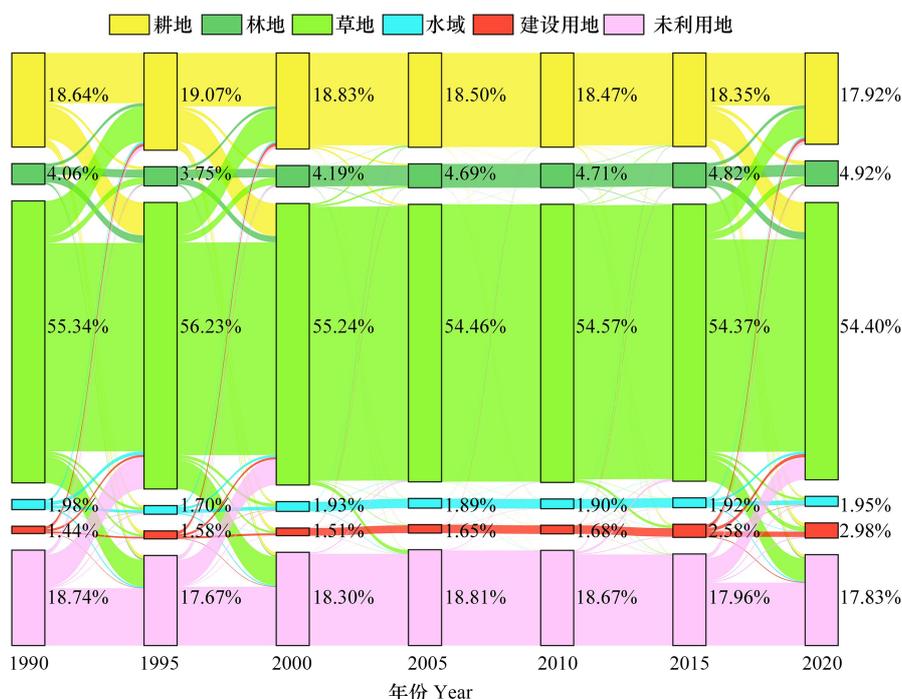


图 3 1990—2020 年研究区土地利用转移变化

Fig.3 Changes in land use transfer in the study area from 1990 to 2020

### 3.2 ESV 的时空演变

#### 3.2.1 ESV 的时间变化

1990—2020 年研究区 ESV 呈先下降后上升趋势,其中在 1990—1995 年 ESV 下降的最多,在此期间林地面积和水域面积减少幅度均为最大,分别减少了 7.64%、14.14%,损失的林地主要转变成耕地和草地,损失的水域主要转变成草地。在 2000—2005 年 ESV 上升的最多,在此期间林地面积增幅最大,达到了 11.89%,增长的林地主要来源于耕地和草地。ESV 在研究期内总体上增加了 62.28 亿元,主要在于由草地和耕地转化而来的林地面积增加了 21.18%。(表 2 和图 4)。

表 2 1990—2020 年研究区各地类 ESV/亿元

Table 2 ESV of different land use types in the study area from 1990 to 2020

土地类型 Land use type	年份 Year						
	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
耕地 Cropland	241.69	239.51	272.89	280.65	271.11	270.81	271.30
林地 Forest	272.39	251.19	317.61	386.13	361.98	366.18	399.04
草地 Grassland	1569.55	1616.77	1473.56	1473.25	1513.34	1474.78	1482.76
水域 Water	534.31	492.86	535.61	512.23	518.74	540.76	533.26
未利用地 Unused land	25.90	24.30	20.29	21.57	21.50	21.75	19.76
合计 Total	2643.84	2624.63	2619.96	2673.83	2686.67	2674.28	2706.12

ESV:生态系统服务价值 Ecosystem service value

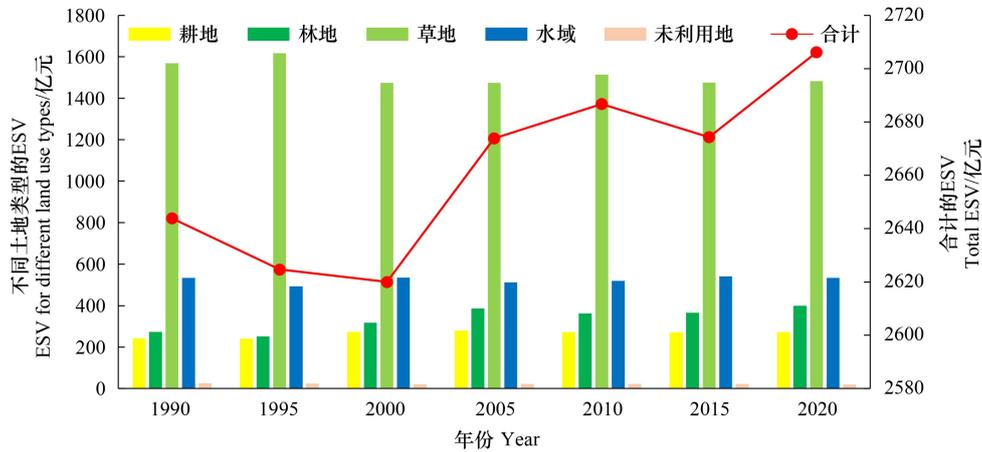


图 4 1990—2020 年各地类 ESV 变化

Fig.4 Changes in ESV of different land use types in the study area from 1990 to 2020

ESV:生态系统服务价值 Ecosystem service value

### 3.2.2 ESV 的空间变化

在空间格局上,研究区 ESV 空间分异明显(图 5)。研究区 ESV 总体呈现东高西低的分布格局,ESV 高值分布以河流水系为中心,ESV 较高值集中分布在呼和浩特市大青山保护区的林地,低值以未利用地类型为主要分布区。该分布趋势与土地利用分布基本吻合,研究区西北部干旱少雨,人类活动较少,土地利用以未利用地为主,植被覆盖率低,ESV 较低。而东南部地势相对平坦,海拔较低降水较多,植被覆盖率高,ESV 较高;河流成为高值中心主要与水域的单位面积 ESV 高有关。

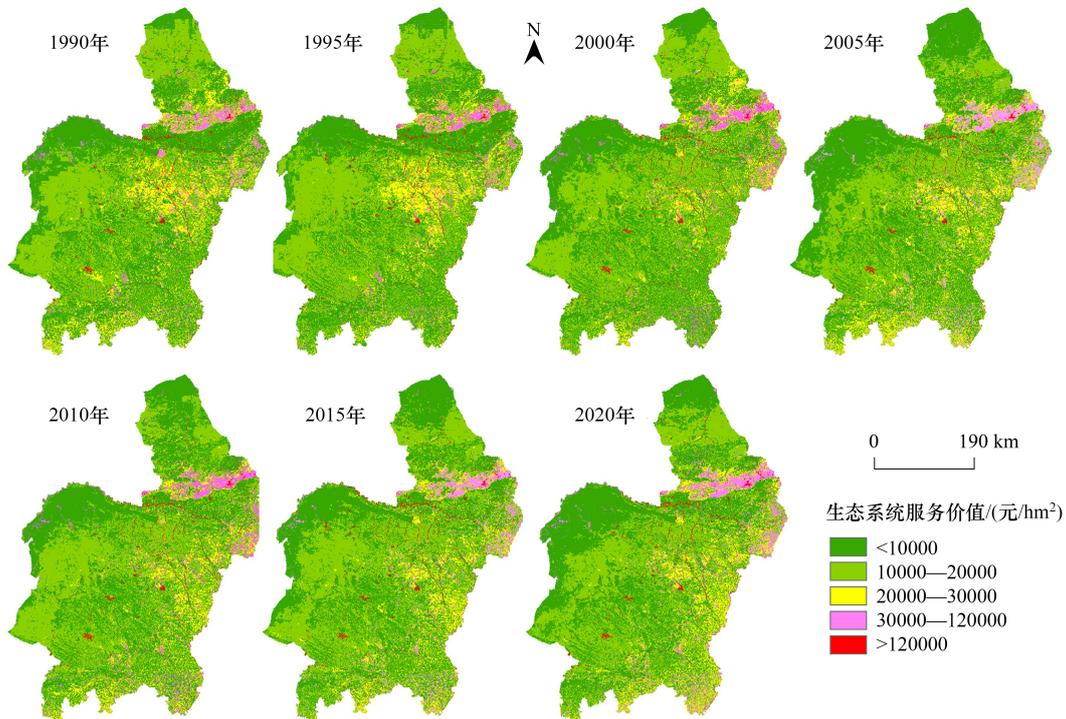


图 5 1990—2020 年研究区 ESV 密度分布

Fig.5 Spatial distribution of ESV density in the study area from 1990 to 2020

总体来看,在 1990—2020 年间 73.52% 研究区的 ESV 变化不显著,ESV 的退化区面积占比(9.76%)高于改善区(6.38%)(图 6)。大幅退化和一般退化面积占比分别为 1.62%、8.14%,大幅改善和一般改善面积占比分别为 1.47%、4.91%。退化区主要集中分布在包头市北部和零星分布在鄂尔多斯市大部分地区,改善区主要分布在呼和浩特市和榆林市的东南部地区。虽然 ESV 的退化面积大于改善面积,但由于改善区主要位于土地类型由未利用地、草地向林地、水域转化的区域,单位面积林地和水域的 ESV 更高,因此整体上研究区的 ESV 呈增加趋势。

本文进一步通过热点分析揭示 ESV 的空间集聚特征及其演变规律。研究区 ESV 冷热点总体上呈“西冷东热”的空间分布格局(图 7),研究区约 84% 地区的 ESV 空间集聚特征不显著,ESV 高值集聚和低值集聚所占区域面积比例分别约为 10%、6%。ESV 热点区集中分布在研究区东北部呼和浩特市北部的武川县境内,该区域林地分布广泛,ESV 次热点区围绕热点区四周分布。ESV 冷点区主要分布在研究区西北部的鄂尔多斯市杭锦旗境内,ESV 次冷点区聚集分布在包头市的

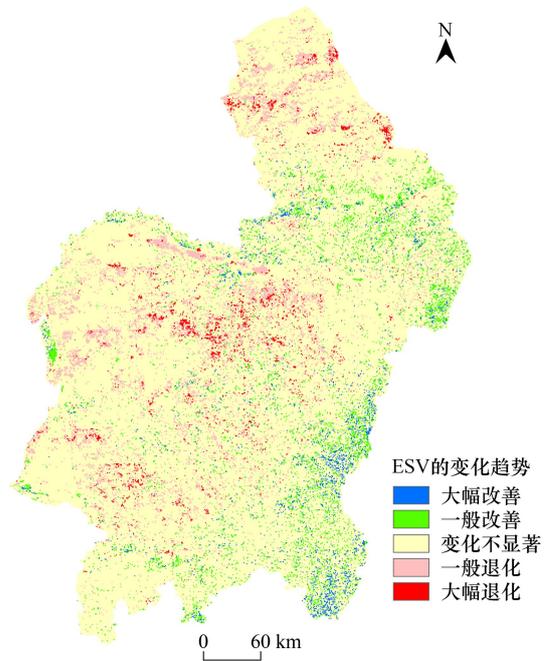


图 6 1990—2020 年研究区 ESV 的变化趋势空间分布  
Fig.6 Spatial distribution of change trend of ESV from 1990 to 2020

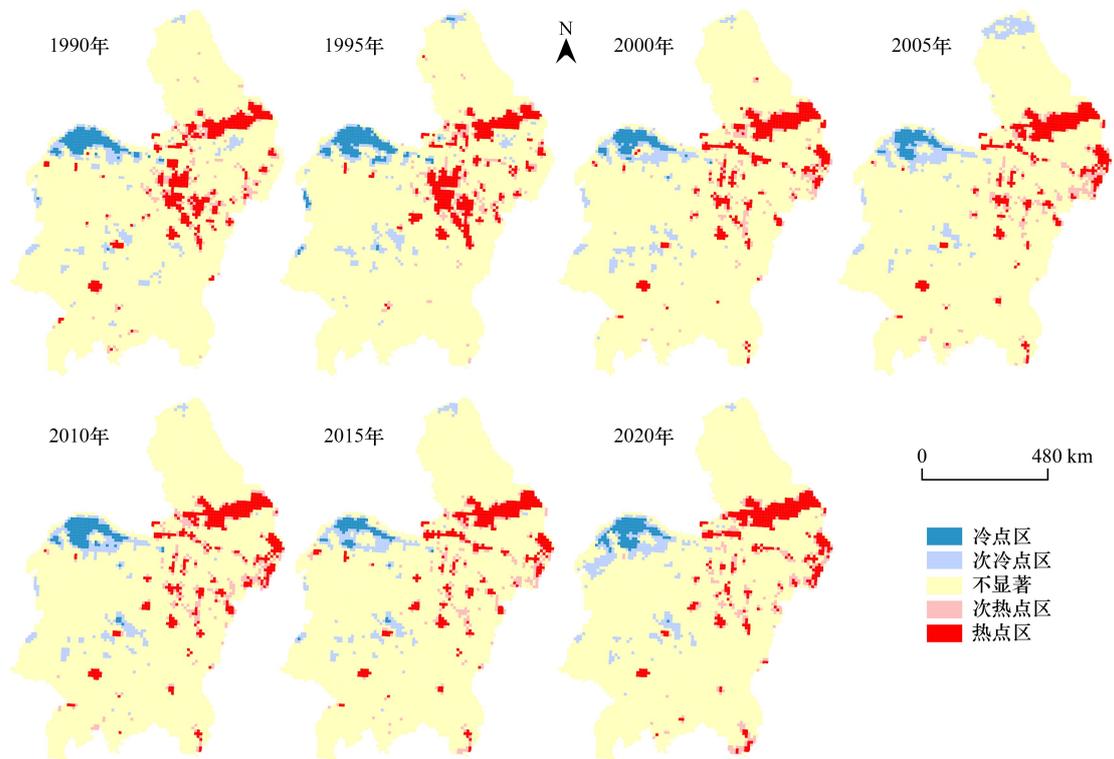


图 7 1990—2020 年研究区 ESV 冷热点的空间分布  
Fig.7 Spatial distribution of ESV hot and cold spots in the study area from 1990 to 2020

最北部境内,该区域分布较广的是未利用地。从各时期阶段来看,热点区和冷点区面积呈波动下降趋势,次热点区和次冷点区面积呈波动上升趋势,表明研究区 ESV 高值和低值聚类均逐渐弱化。

### 3.3 ESV 驱动因素分析

#### 3.3.1 驱动因素的重要性识别

耦合随机森林模型和 SHAP 方法分析研究区 ESV 的驱动因素作用方向及各驱动因素的相对重要性(图 8)。ESV 的驱动因素重要性从大到小依次为水域比例、未利用地比例、林地比例、降水、坡度、草地比例、土壤容重、人口密度、潜在蒸散发、GDP 密度、气温、黏土含量、高程、建设用地比例和耕地比例,表明土地类型中水域比例是影响 ESV 最重要的驱动因素,其次是未利用地比例,耕地比例在研究区的重要性最低。从驱动因素的作用方向来看,水域比例、林地比例、降水、坡度、草地、土壤容重、黏土含量和高程对研究区 ESV 有促进作用,未利用地比例、人口密度、潜在蒸散发、GDP 密度、气温、建设用地比例和耕地比例对研究区 ESV 有抑制作用。从驱动因素的维度来看,土地利用类型的贡献度为 61.24%,成为最重要的驱动力;其次是地形和气象的贡献度分别为 17.59%和 17.05%,土壤和社会经济的贡献度分别为 2.39%和 1.73%。

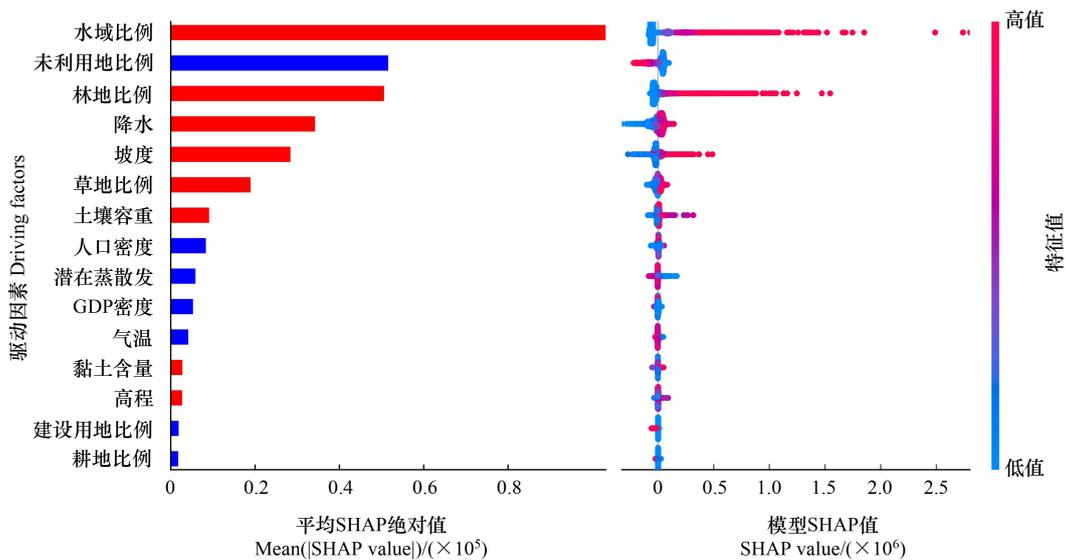


图 8 驱动因素重要性排序图和模型 SHAP 摘要图

Fig.8 Importance ranking of driving factors and model SHAP summary graph

SHAP:沙普利加和解释 Shapley additive explanations

#### 3.3.2 ESV 对驱动因素的响应特征

通常,ESV 驱动因素间存在不同强度的相关性,这会干扰单一驱动因素对 ESV 的影响分析,SHAP 方法可以较好地排除其他因素的干扰,剥离出 ESV 随单一驱动因素的变化趋势(图 9)。

总体来看,ESV 对驱动因素的响应呈现出非线性变化特征。在社会经济因素中,当 GDP 密度和人口密度较低时,GDP 和人口的 SHAP 值大于 0,显示正贡献,表现出对 ESV 的促进作用;随着经济的发展和人口的增长开始对 ESV 产生抑制作用。在气象因素中,降水和气温对 ESV 的影响均存在明显的阈值效应,降水在低于和高于 250 mm 时分别对 ESV 起抑制和促进作用,气温在低于和高于 7.5℃ 时分别对 ESV 起促进和抑制作用;在潜在蒸散发低于 1000 mm 时,潜在蒸散发对 ESV 的促进作用随潜在蒸散发的增加持续减弱,当潜在蒸散发高于 1000 mm 时,响应曲线在 SHAP 为 0 值的附近维持较为平稳,表明对 ESV 的影响较小。高程在低于和高于 1300 m 时分别对 ESV 起抑制和促进作用,随着高程的增加促进作用不再增强,坡度对 ESV 始终起促进作用。土壤容重和黏土含量在低值时对 ESV 无显著作用,在高值时具有促进作用。耕地比例较低时对 ESV 无显著影响,较高时开始呈现抑制作用。未利用地比例在低于和高于 25% 时对 ESV 分别起促进和抑制

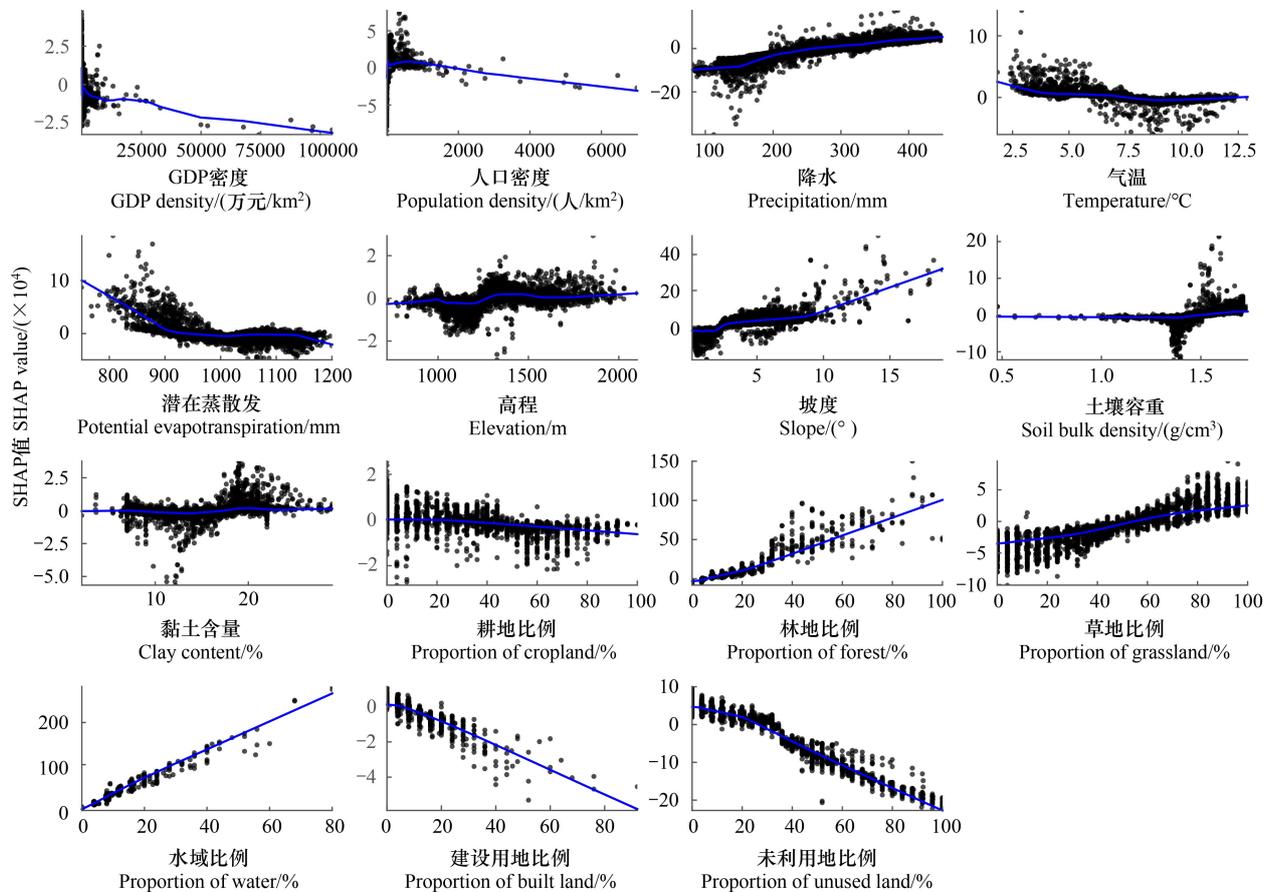


图9 ESV对驱动因素的变化响应特征

Fig.9 Response characteristics of ESV to driving factors

作用,建设用地比例对ESV始终起抑制作用。林地和水域比例始终对ESV起促进作用,草地比例在低于和高于50%时分别起抑制和促进作用。

### 3.3.3 驱动因素的交互效应

ESV的变化受驱动因素的综合影响,不同驱动因素之间还存在相互影响,SHAP方法可捕捉交互性最强的成对的驱动因素对ESV的相互作用效果(图10)。

GDP密度和人口密度与其他驱动因素无明显交互作用,这可能是由于研究区的社会经济因素对ESV影响的贡献率较低。在以水域比例为交互项中,在水域比例较高的地区,降水与水域比例的交互作用对ESV呈现出由抑制作用减弱到促进作用增强的变化趋势,而气温、潜在蒸散发与水域比例的交互作用对ESV均呈现出由促进作用减弱到抑制作用增强的变化趋势。在水域比例较低的地区,降水与水域比例的交互作用对ESV呈现出由抑制作用减弱到促进作用增强的变化趋势,但交互作用程度相对较低;气温、潜在蒸散发与水域比例的交互作用均不明显,未利用地比例对ESV具有更强的抑制作用。在降水量较多的地区,高程与降水无明显交互作用;但在降水量较少的地区,高程与降水的交互作用对ESV呈现出由抑制作用减弱到促进作用增强后又趋于稳定的变化趋势。在以林地比例为交互项中,在林地比例较高的地区,坡度、土壤容重和黏土含量的增加均对ESV呈现抑制减弱到促进增强的变化趋势,耕地比例的增加对ESV具有抑制作用;在林地比例较低的地区,坡度、土壤容重、黏土含量和耕地比例与林地比例无明显交互作用。林地比例在坡度大的地区较在坡度小的地区对ESV有更强的促进作用。在以耕地比例为交互项中,在耕地比例较大(较小)的地区,草地比例的增加对ESV的抑制(促进)作用减弱(增强),建设用地比例在耕地比例较大的地区对ESV具有更强的抑制作

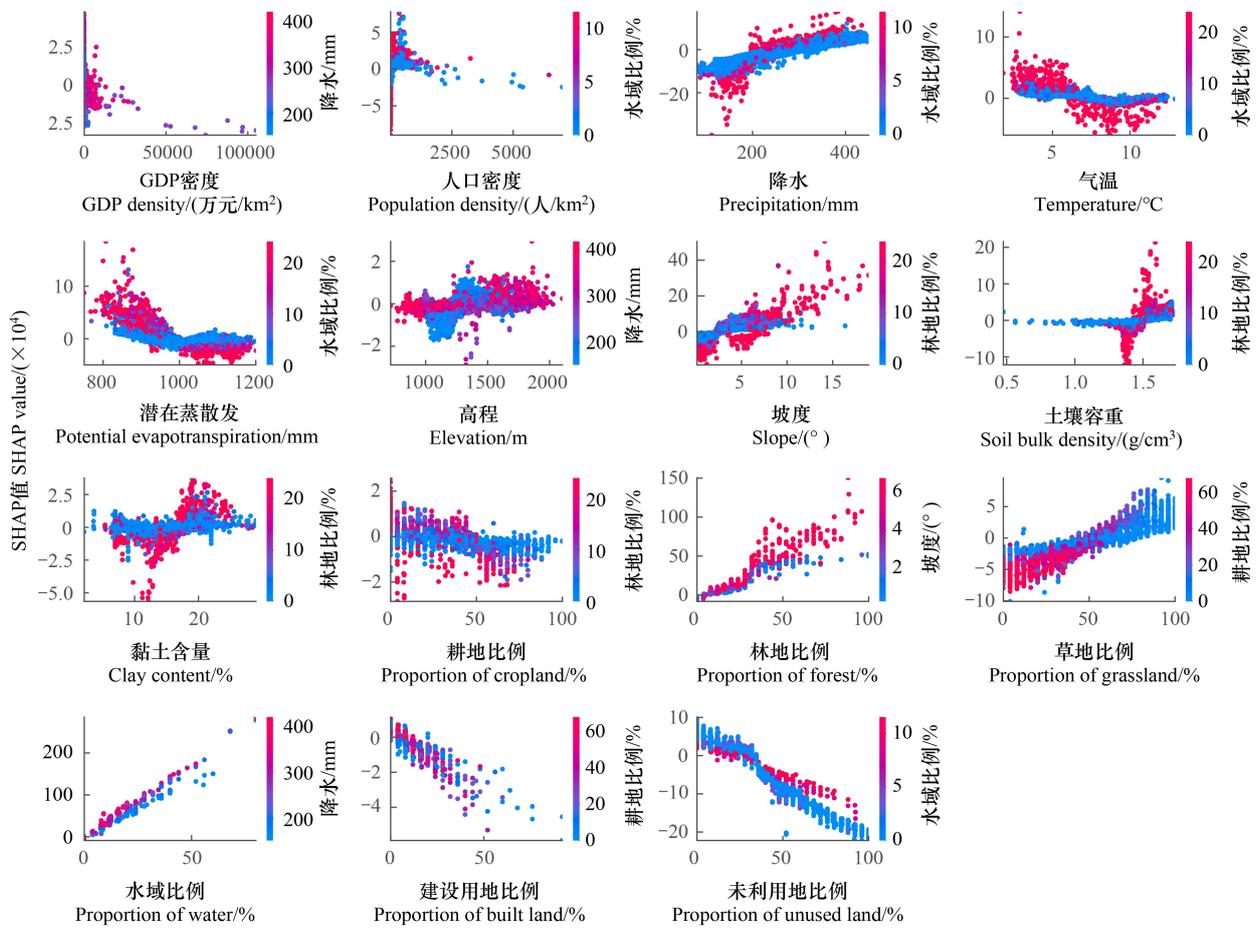


图 10 驱动因素的交互效应

Fig.10 Interaction effects of driving factors

用。水域比例在降水较多的地区对 ESV 具有更强的促进作用。

随机森林模型耦合 SHAP 方法只能衡量两个驱动因素间的交互作用大小、方向及变化趋势,多种驱动因素间的交互作用路径如何需要进一步探讨。将驱动因素分为社会经济(GDP、人口)、气象(降水、气温、潜在蒸散发)、地形(高程、坡度)、土壤(黏土含量、土壤容重)和土地利用类型共 5 个潜变量,采用偏最小二乘路径模型探究各驱动因素潜变量间的交互路径(图 11),模型拟合度指数(GOF)为 0.64,表明模拟结果符合精度要求。

土地利用类型对 ESV 的影响系数为 0.696(图 11),再次表明土地利用对 ESV 的影响起着决定作用。社会经济受到地形因素的制约影响,社会经济对土地利用和 ESV 的影响系数分别为 0.222 和-0.186,表明社会经济对 ESV 的直接影响是负效应,社会经济主要通过直接影响土地利用进而间接影响 ESV。气象对 ESV 的直接作用较弱,主要是通过气象-土壤-土地利用或气象-土地利用作用路径影响 ESV。地形对 ESV 的影响路径有多条,地形对社会经济、气象、土壤和土地利用均有直接影响,其中对土壤的直接影响最强。土壤受到地形、社会经济和气象的影响,土壤对 ESV 的影响主要是通过影响土地利用产生的间接影响。除土地利用以外,其他因素对 ESV 的间接影响均大于直接影响。

#### 4 讨论

在 ESV 的变化响应特征方面,以前的研究尚未有 ESV 对驱动因素变化响应特征的探讨;在交互作用分析

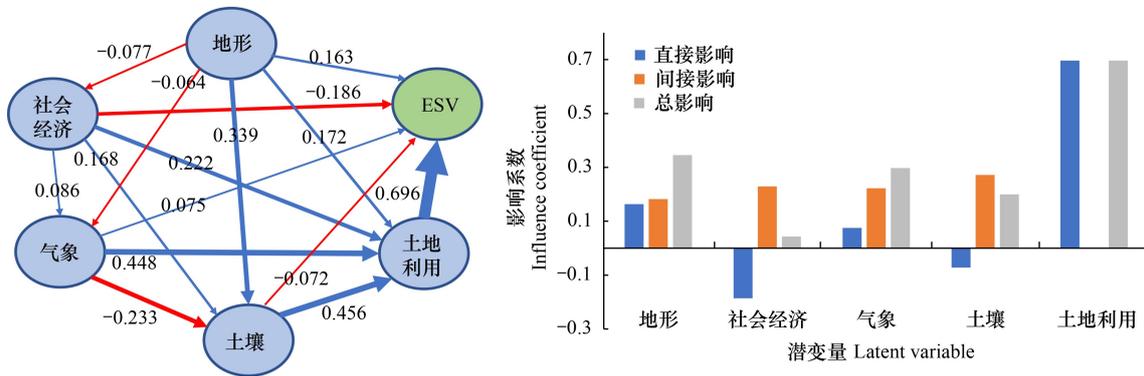


图 11 驱动因素的交互作用路径和影响程度

Fig.11 Interaction paths and influence coefficients of driving factors

方面,当前大量的研究采用地理探测器方法,但该方法未能识别交互作用的方向性;耦合随机森林模型和 SHAP 的方法能识别驱动因素在不同值域内的交互作用大小、方向和非线性响应特征;在交互路径分析方面,当前研究主要采用结构方程模型识别交互路径,本文选择结构方程模型中的偏最小二乘路径模型,该方法对样本量和样本分布要求低<sup>[23,38]</sup>,模拟结果精度较好,表现出了较好的适用性。综上,本研究耦合随机森林模型和 SHAP 方法并结合偏最小二乘路径模型,可以较为系统全面地分析 ESV 的驱动因素及其交互效应。

本研究表明土地利用的变化强烈影响 ESV,这与之前的研究一致<sup>[23,39]</sup>。ESV 在 2000 年前后分别呈下降和上升的趋势,ESV 的增加主要来自于耕地和草地向林地转换的结果。林地面积在 2000 年之后逐渐增加,这得益于当地“退耕还林还草”政策和“三北”防护林工程的实施。尤其是在 ESV 大幅改善的区域,例如,位于榆林北部的毛乌素沙地,由于近二十年的持续造林治沙活动,ESV 得到了大幅提升。人类社会经济活动对生态系统服务的需求是其影响 ESV 变化的根本原因<sup>[24]</sup>,本研究中 GDP 和人口的增长对 ESV 的影响由促进作用转变为抑制作用,表明较低程度的人类活动对生态环境具有改善作用,但在高收入地区大量人口的高需求和有限的供应水平将导致生态系统服务稀缺,从而对 ESV 产生抑制作用。偏最小二乘路径模型进一步揭示了社会经济因素对 ESV 的直接和间接影响是相反的,社会经济通过气象、土壤和土地利用对 ESV 产生间接的积极影响(图 11),表明经济发展可能会在自然变化过程中改变生态系统服务演化的方向<sup>[40]</sup>。以往的研究表明,城市扩张和经济发展会直接加剧生态系统服务供需失衡<sup>[41]</sup>。此外,更多生态环境政策的实施也会间接促进了生态系统服务功能的恢复和提升<sup>[42]</sup>。因此,结合经济发展和自然条件的空间差异,优化土地利用配置,对提高 ESV 具有重要意义。考虑到水域是最重要的驱动因素,草地对研究区的 ESV 贡献最大。未来的生态恢复实践应优先考虑湿地和湖泊生态系统提供的生态价值和效益,通过跨省联动、多方补水、关闭周围煤矿等保护措施,加强红碱淖湿地国家自然保护区的生态保护;在沿黄河湿地建设沿黄生态廊道,严格保护基本林地和草原。

本研究发现降水和气温对 ESV 的影响具有阈值效应,在年降水量低于 250 mm 或年均气温高于 7.5℃ 的地区,降水或气温成为该地区 ESV 提升的限制因子,即该地区降水和气温对 ESV 具有负贡献,随着降水的增加或气温的降低这种负贡献逐渐减小直至变为正贡献。在整个研究区内,降水的增加或气温的降低始终对 ESV 具有提升作用,原因在于研究区位于干旱半干旱区,热量充足而降水量小,有限的降水还未被植被充分吸收利用就已经蒸散发了。在交互分析中,水域比例是参与最多的交互项,主要在于 ESV 当量表中心水域的值最大,水域比例成为最重要的驱动因素,这也导致降水和气温在水域比例较高的地区对 ESV 具有更大的影响程度。

本研究仍存在一定的局限性。首先,基于当量因子法的 ESV 的评价严重依赖于土地利用数据,在一定程度上可能夸大了土地利用类型对 ESV 的影响,后期应尝试采用其他 ESV 评价方法进一步验证不同驱动因素

的重要性。其次,本研究 ESV 的驱动因素分析是基于分辨率为 5 km 的格网尺度,但是不同空间尺度上的驱动影响和交互关系尚不清楚,尺度效应增加了研究结论的不确定性,后续应该在不同空间尺度探究 ESV 的驱动因素。此外,本研究尚未考虑政策因素对 ESV 的影响,因此未来的工作应该将政策因素充分考虑进来。

## 5 结论

本研究核算了 1990—2020 年呼包鄂榆城市群的 ESV 并分析其时空变化特征,耦合随机森林模型和 SHAP 方法探究了 ESV 驱动因素的贡献程度、作用方向、变化响应特征及其交互效应,进一步采用偏最小二乘路径模型识别了交互路径。结论如下:(1)草地对研究区的 ESV 贡献最大,其次是水域;研究区的 ESV 在 1990—2020 年呈波动上升趋势,总体增加了 62.28 亿元,ESV 的增长主要源自于单位面积 ESV 较低的草地和耕地向单位面积 ESV 较高的林地的转化。(2)ESV 对驱动因素呈非线性变化响应特征;土地利用类型是最重要的驱动因素,其贡献度达到 61.24%,地形和气象的贡献度分别为 17.59% 和 17.05%,土壤和社会经济的贡献度较低,分别为 2.39% 和 1.73%。(3)水域比例是最重要的交互项,其次是林地比例;不同因素间交互作用在因素处于不同范围内表现出不同的交互效应。(4)土地利用类型直接作用于 ESV,其他因素主要通过直接影响土地利用类型进而间接影响 ESV,且对 ESV 的间接影响均大于直接影响。

## 参考文献(References):

- [ 1 ] Costanza R. Valuing natural capital and ecosystem services toward the goals of efficiency, fairness, and sustainability. *Ecosystem Services*, 2020, 43: 101096.
- [ 2 ] Guerry A D, Polasky S, Lubchenco J, Chaplin-Kramer R, Daily G C, Griffin R, Ruckelshaus M, Bateman I J, Duraiappah A, Elmqvist T, Feldman M W, Folke C, Hoekstra J, Kareiva P M, Keeler B L, Li S Z, McKenzie E, Ouyang Z Y, Reyers B, Ricketts T H, Rockström J, Tallis H, Vira B. Natural capital and ecosystem services informing decisions: from promise to practice. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(24): 7348-7355.
- [ 3 ] 熊睿毅,刘艳芳,银超慧,解鹏,张紫怡. 格网尺度下福建省生态服务价值的动态评估. *地理空间信息*, 2021, 19(4): 78-83, 88, 7.
- [ 4 ] Fang L L, Wang L C, Chen W X, Sun J, Cao Q, Wang S Q, Wang L Z. Identifying the impacts of natural and human factors on ecosystem service in the Yangtze and Yellow River Basins. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 314: 127995.
- [ 5 ] Shen J S, Li S C, Liu L B, Liang Z, Wang Y Y, Wang H, Wu S Y. Uncovering the relationships between ecosystem services and social-ecological drivers at different spatial scales in the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 290: 125193.
- [ 6 ] Dai X, Wang L C, Huang C B, Fang L L, Wang S Q, Wang L Z. Spatio-temporal variations of ecosystem services in the urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River, China. *Ecological Indicators*, 2020, 115: 106394.
- [ 7 ] Sun X Y, Shan R F, Liu F. Spatio-temporal quantification of patterns, trade-offs and synergies among multiple hydrological ecosystem services in different topographic basins. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 268: 122338.
- [ 8 ] 王亚慧,戴尔阜,马良,尹乐. 横断山区产水量时空分布格局及影响因素研究. *自然资源学报*, 2020, 35(2): 371-386.
- [ 9 ] Luo Q L, Zhou J F, Li Z G, Yu B L. Spatial differences of ecosystem services and their driving factors: a comparison analysis among three urban agglomerations in China's Yangtze River Economic Belt. *Science of the Total Environment*, 2020, 725: 138452.
- [ 10 ] Li J H, Bai Y, Alatalo J M. Impacts of rural tourism-driven land use change on ecosystems services provision in Erhai Lake Basin, China. *Ecosystem Services*, 2020, 42: 101081.
- [ 11 ] 孙滨峰,赵红,逯非,王效科. 东北森林带森林生态系统固碳服务空间特征及其影响因素. *生态学报*, 2018, 38(14): 4975-4983.
- [ 12 ] 璩路路,刘彦随,周扬,李裕瑞. 罗霄山区生态用地时空演变及其生态系统服务功能的响应——以井冈山为例. *生态学报*, 2019, 39(10): 3468-3481.
- [ 13 ] Liu Z T, Wu R, Chen Y X, Fang C L, Wang S J. Factors of ecosystem service values in a fast-developing region in China: insights from the joint impacts of human activities and natural conditions. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 297: 126588.
- [ 14 ] Pan N H, Guan Q Y, Wang Q Z, Sun Y F, Li H C, Ma Y R. Spatial Differentiation and Driving Mechanisms in Ecosystem Service Value of Arid Region: a case study in the middle and lower reaches of Shule River Basin, NW China. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 319: 128718.
- [ 15 ] 陈睿,杨灿,杨艳,董祥泽. 洞庭湖生态经济区生态系统服务价值的时空演绎及其驱动因素. *应用生态学报*, 2022, 33(1): 169-179.
- [ 16 ] 王若思,潘洪义,刘翊涵,唐玉萍,张之风,马红菊. 基于动态当量的乐山市生态系统服务价值时空演变及驱动力研究. *生态学报*, 2022, 42(1): 76-90.
- [ 17 ] Wei X J, Zhao L, Cheng P G, Xie M R, Wang H M. Spatial-temporal dynamic evaluation of ecosystem service value and its driving mechanisms in China. *Land*, 2022, 11(7): 1000.
- [ 18 ] Wang P Q, Li R J, Liu D J, Wu Y M. Dynamic characteristics and responses of ecosystem services under land use/land cover change scenarios in

- the Huangshui River Basin, China. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109539.
- [19] Liu W, Zhan J Y, Zhao F, Wang C, Zhang F, Teng Y M, Chu X, Kumi M A. Spatio-temporal variations of ecosystem services and their drivers in the Pearl River Delta, China. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 337: 130466.
- [20] Li Y Y, Xia M, Ma Q, Zhou R, Liu D, Huang L C. Identifying the influencing factors of cooling effect of urban blue infrastructure using the geodetector model. *Remote Sensing*, 2022, 14(21): 5495.
- [21] Song Y Z, Wang J F, Ge Y, Xu C D. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: cases with different types of spatial data. *GIScience & Remote Sensing*, 2020, 57(5): 593-610.
- [22] Gao F, Li S Y, Tan Z Z, Wu Z F, Zhang X M, Huang G P, Huang Z W. Understanding the modifiable areal unit problem in dockless bike sharing usage and exploring the interactive effects of built environment factors. *International Journal of Geographical Information Science*, 2021, 35(9): 1905-1925.
- [23] Li W S, Wang L Q, Yang X, Liang T, Zhang Q, Liao X Y, White J R, Rinklebe J. Interactive influences of meteorological and socioeconomic factors on ecosystem service values in a river basin with different geomorphic features. *Science of the Total Environment*, 2022, 829: 154595.
- [24] Li X, Deng S Q, Ma X D. Mechanism analysis of ecosystem services (ES) changes under the proposed supply-demand framework: a case study of Jiangsu Province, China. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109572.
- [25] Gao F J, Cui J F, Zhang S, Xin X H, Zhang S L, Zhou J, Zhang Y. Spatio-temporal distribution and driving factors of ecosystem service value in a fragile hilly area of North China. *Land*, 2022, 11(12): 2242.
- [26] Cui Y, Lan H F, Zhang X S, He Y. Confirmatory analysis of the effect of socioeconomic factors on ecosystem service value variation based on the structural equation model—a case study in Sichuan Province. *Land*, 2022, 11(4): 483.
- [27] 马伟波, 杨帆, 王楠, 赵立君, 谭琨, 张孝飞, 张龙江, 李海东. 长三角城市群地区生态系统服务价值时空演变及驱动因素研究. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(11): 1365-1376.
- [28] Xu X H, Yu J, Wang F E. Analysis of ecosystem service drivers based on interpretive machine learning: a case study of Zhejiang Province, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(42): 64060-64076.
- [29] Liu C, Qi Y, Wang Z B, Yu J L, Li S, Yao H, Ni T H. Deep learning: To better understand how human activities affect the value of ecosystem services—A case study of Nanjing. *PLOS ONE*, 2020, 15(10): e0238789.
- [30] Guo C Y, Gao J H, Zhou B Y, Yang J. Factors of the Ecosystem Service Value in Water Conservation Areas Considering the Natural Environment and Human Activities: A Case Study of Funiu Mountain, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(21): 11074.
- [31] Apley D W, Zhu J Y. Visualizing the effects of predictor variables in black box supervised learning models. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, 2020, 82(4): 1059-1086.
- [32] Lundberg S M, Erion G, Chen H, DeGrave A, Prutkin J M, Nair B, Katz R, Himmelfarb J, Bansal N, Lee S I. From local explanations to global understanding with explainable AI for trees. *Nature Machine Intelligence*, 2020, 2(1): 56-67.
- [33] 魏乐, 周亮, 孙东琪, 唐相龙. 黄河流域城市群扩张的时空格局演化及情景模拟——以呼包鄂榆城市群为例. *地理研究*, 2022, 41(6): 1610-1622.
- [34] 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.
- [35] 于昊辰, 陈浮, 尹登玉, 韩晓彤, 牟守国, 雷少刚, 卞正富. 采矿与气候变化对戈壁矿区土地生态系统的影响——以准东煤炭基地为例. *煤炭学报*, 2021, 46(8): 2650-2663.
- [36] Lambert M, Surhone, Mariam T, Tennoe, Susan F, Henssonow. *Random Forest*. *Machine Learning*, 2010, 45(1): 5-32.
- [37] Lundberg S M, Lee S I. A unified approach to interpreting model predictions. *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems*. December 4-9, 2017, Long Beach, California, USA. New York: ACM, 2017: 4768 - 4777.
- [38] 孔德莉, 张海涛, 何迅, 任文海, 胡群中, 肖斯予, 武学妍. 基于PLSPM模型的鄂西南部分区域耕地土壤pH影响因素研究. *土壤*, 2021, 53(4): 809-816.
- [39] Liu J M, Xiao B, Jiao J Z, Li Y S, Wang X Y. Modeling the response of ecological service value to land use change through deep learning simulation in Lanzhou, China. *Science of the Total Environment*, 2021, 796: 148981.
- [40] Liu W, Zhan J Y, Zhao F, Yan H M, Zhang F, Wei X Q. Impacts of urbanization-induced land-use changes on ecosystem services: a case study of the Pearl River Delta Metropolitan Region, China. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 228-238.
- [41] Chen J Y, Jiang B, Bai Y, Xu X B, Alatalo J M. Quantifying ecosystem services supply and demand shortfalls and mismatches for management optimisation. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 1426-1439.
- [42] Bai Y, Jiang B, Wang M, Li H, Alatalo J M, Huang S F. New ecological redline policy (ERP) to secure ecosystem services in China. *Land Use Policy*, 2016, 55: 348-351.