崔琦泽,张仲伍.黄河流域中游生态系统服务价值时空变化特征及驱动因素[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(5):125-136.
Cui Q Z, Zhang Z W. Spatio-temporal variation characteristics and driving factors of ecosystem service values in the middle reaches of the Yellow River Basin[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025, 45(5): 125-136.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202508046

黄河流域中游生态系统服务价值时空变化特征及驱动因素

崔琦泽,张仲伍*

(山西师范大学 地理科学学院,山西 太原 030031)

摘　要:[目的]受土壤结构松散、地形起伏显著及植被覆盖度低等因素共同影响,黄土高原地区生态环境稳定性较差,致使黄河中游段成为我国生态环境脆弱性较为突出的典型区域,准确估算生态系统服务价值(ESV)动态变化及其影响因素对促进黄河流域中游可持续发展具有重要意义。[方法]本文基于修正后的当量因子法构建包含建设用地的ESV估值模型,并通过土地利用转移矩阵、XGBoost-SHAP模型等方法,考察研究区土地利用和ESV的动态演变,以及ESV的影响因素。[结果](1)黄河流域中游的土地利用类型及转变以耕地、草地和森林为主。耕地和建设用地单一土地利用动态变化显著,分别为-2.95%和1.90%;土地利用综合动态变化平均为0.15%,2005-2010年最大为0.32%。(2)黄河流域中游的ESV值逐渐降低,总降低率为21.95%。ESV较低值区和中值区缩小,其余各级扩大,呈现出由西北向东南递减的空间分布格局。(3)夜间灯光亮度是影响黄河流域中游ESV变化的最主要因素,占23.03%。平均坡度、森林比例和年平均气温对ESV有正向影响,而夜间灯光亮度、耕地比例、人口密度和平均海拔对ESV有负向影响。其它因素的影响相对较小。[结论]由于经济快速发展和城市化逐渐推进,黄河流域中游的ESV值呈降低趋势,有必要深入了解自然和人类活动对生态环境的影响。研究结果可为黄河流域中游生态系统服务空间格局优化及生态保护策略的制定提供科学支撑。

关键词:生态系统服务价值;土地利用变化;XGBoost-SHAP模型;黄河流域中游
中图分类号:X171.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)05-0125-12

Spatio-temporal variation characteristics and driving factors of ecosystem service values in the middle reaches of the Yellow River Basin

Cui Qize, Zhang Zhongwu*

(*College of Geographic Science, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, China*)

Abstract: [Objective] Factors such as loose soil structure, significant terrain undulation, and low vegetation coverage contribute to poor ecological stability in the Loess Plateau region, making the middle reaches of the Yellow River a typical area of prominent ecological vulnerability in China. Accurately estimating the dynamic changes in ecosystem service value (ESV) and its influencing factors is of great significance for promoting sustainable development in this region. [Methods] This study constructed an ESV valuation model that included construction land, based on a modified equivalent factor method. Using the land use transfer matrix and XGBoost-SHAP model, we examined the dynamic evolution of land use and ESV, as well as the factors influencing ESV in the study area. [Results] (1) Land use types and transitions in the middle reaches of the Yellow River Basin were primarily characterized by cultivated Land, grassland, and forest. The dynamic changes in single land use types, particularly cultivated land and construction land, were significant, with rates of -2.95% and 1.90%, respectively. The comprehensive land use dynamic degree averaged 0.15%, peaking at 0.32% from 2005 to 2010. (2) The total ESV in the middle reaches

收稿日期:2025-08-17　　**修回日期**:2025-09-30
基金项目:山西省基础研究计划项目(202303021222184);山西省哲学社会规划课题(2024QN058);山西省高等学校科技创新项目(2023W058)
作者简介:崔琦泽(ORCID:0009-0002-6895-9173),硕士研究生,研究方向:环境科学与资源利用.
*通信作者:张仲伍,教授,硕士生导师,E-mail: zhangzw@sxnu.edu.cn.

of the Yellow River Basin gradually decreased, with an overall reduction rate of 21.95%. Areas with low and medium ESV shrank, while those with higher ESV expanded, presenting a spatial distribution pattern that decreased from northwest to southeast. (3) Nighttime light intensity was the most significant factor affecting ESV changes, accounting for 23.03%. Average slope, forest proportion, and annual average temperature had positive effects on ESV, whereas nighttime light intensity, cultivated land proportion, population density, and average altitude had negative effects. The influence of other factors was relatively minor. [Conclusion]Due to rapid economic development and the gradual advancement of urbanization, the ESV in the middle reaches of the Yellow River Basin showed a decreasing trend. It is essential to deepen the understanding of the impacts of natural and human activities on the ecological environment. The findings of this study can provide scientific support for optimizing the spatial pattern of ecosystem services and formulating ecological protection strategies in the middle reaches of the Yellow River Basin.

Keywords: Ecosystem services value, Land use changes, XGBoost-SHAP model, Middle reaches of the Yellow River Basin

生态系统服务(ES)是指人类从自然界中获得的直接或间接利益。生态系统服务价值(ESV)是用于量化生态系统服务的指标[1]。土地利用结构的变化与生态系统密切相关[2],系统评估不同土地利用类型的动态变化及其对生态系统服务价值(ESV)时空格局的影响,对于推动生态补偿和修复和构建区域生态安全屏障[3],具有重要的理论与实践意义。在自然和人为因素作用下,区域间的生态系统服务出现明显的时空演变特征[4]。当前学者们主要运用热点探测、空间叠加分析等方法[5-7],在市域[8]、省域[9]、都市圈[10]、城市群[11]、流域[6,12]或粮食主产区[13]和生态功能区[14]等区域开展研究,研究成果科学揭示了区域内生态环境变化趋势方向[15]。综上所述,土地利用变化与ESV变化研究已取得显著成果。然而黄河上中下游具有不同生态环境条件,针对黄河中游土地利用和生态系统服务价值的研究仍较少。

随着生态系统服务研究的不断深化,探索其驱动机制成为研究热点。现有研究主要采用了Pearson相关分析[16]、线性回归[17]、地理加权回归(GWR)[10]等方法,但这些传统方法在捕捉ESV与各影响因子间的非线性关系以及评估特征重要性等方面具有明显局限性。近年来,随着机器学习技术的发展,大量研究利用决策树(LGB)[18]、随机森林(RF)[19]以及极端梯度提升(XGBoost)[8,12]等集成学习算法,分析与生态系统服务价值(ESV)相关的各类驱动因素,在识别关键影响因子及预测ESV变化方面取得显著进展。相比其它机器学习方法,XGBoost具有充分挖掘复杂数据,处理数据间非线性关系,准确排序特征重要性,预测结果更加科学等优势[20]。结合SHAP(Shapley Additive exPlanations)方法后,能够从特征层面精准量化各变量对模型预测结果的贡献度[21],有助于研究者辨识影响生态系统服务价值(ESV)的关键驱动因子。

黄河中游区段流经黄土高原,是中国重要的生态屏障与经济地带核心区域,其生态系统相对脆弱,社会经济的发展和资源开发强度的增加对当地的生态环境造成了不良影响[22]。基于此,本文利用修正后的当量因子法构建了包含建设用地的ESV估值模型,并通过土地利用转移矩阵、XGBoost-SHAP模型等方法,考察研究区土地利用和ESV的动态演变,以及影响ESV的驱动因素。旨在为黄河中游地区的生态系统服务可持续发展提供理论依据,推动黄河流域整体生态保护和高质量发展[23]。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

黄河流域中游(33°45~40°11′ N,104°27′~113°39′ E)从内蒙古河口镇到河南郑州桃花峪[24],全长1206 km。按照水利部黄河水利委员会划定的自然流域范围,确定研究区为甘肃省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区、陕西省、山西省、河南省226个县。黄河中游61%的面积为黄土高原,沟壑纵横,植被稀少,水土流失治理困难,是我国典型的生态脆弱区。区域内畜牧业和种植业发展历史悠久,且拥有丰富煤炭、石油等多种矿产资源,是我国重要的能源化工基地,采矿业、煤炭产业、石油化工等产业集聚。当前,随着社会经济发展和资源开发强度增加,黄河流域中游的生态环境可持续发展受到的胁迫越来越严重,出现生态系统服务功能退化,生态服务价值下降的现象。

1.2　数据来源

本文选取2000-2023年间黄河中游地区226个县区的面板数据为研究样本,根据研究区实际情况,将分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地6类。2000、2005、2010、2015、2020、2023年的6期土地利用数据获取自中国科学院资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn/),空间分辨率为30 m×30 m,使用的地理坐标系统一为GCS_Krasovsky_1940。气象数据源于中国科学院资源环境科学与数据平台(https://www.resdc.cn/)。社会经济统计数据获取自研究区内各区县统计年鉴或统计公报(2000-2023年),涉及行政区划调整的以相应年份政府统计数据为准。2023年部分缺失数据以2022年对应数据代替。

1.3　研究方法

1.3.1　土地利用变化

本文使用土地利用动态度和转移矩阵方法,对研究区内6期的土地利用时空演变特征进行分析。单一土地利用动态度用于量化某一地类在研究时段内的面积变化速率,综合土地利用动态度表征区域内整体地类的面积变化速率;土地利用转移矩阵可用于系统描述不同时期各地类之间相互转化的规模与结构,以矩阵形式清晰呈现类型间的转化路径与数量特征,其计算公式参考Qiu等[25]和Wu等的方法[26]。

1.3.2　ESV计算

本研究借鉴谢高地等[27]提出的当量因子法,将1个标准ESV当量所代表的经济价值定义为单位面积粮食产出的1/7。结合黄河中游地区的农业实际种植情况,选取2000-2023年间该流域主要粮食作物(包括稻谷、小麦和玉米)的平均播种面积、单位产量,及不考虑价格波动因素,以2023年为基准的平均粮食单价进行测算[24],最终确定1个ESV当量因子对应经济价值为1 883.46元/hm^2。具体公式如下:

$$E=\frac{1}{7}\sum_{i=1}^{n}\frac{m_i p_i q_i}{M}\ (i=1,\cdots,n) \tag{1}$$

式中:E表示单位面积ESV当量因子的经济价值(元/hm^2);m_i为第i种作物的播种面积(hm^2);p_i为第i种作物的单位产量(kg/hm^2);q_i为第i种作物的平均价格(元/kg);M表示所有主要农作物总播种面积(hm^2)。

(1)　非建设用地ESV计算

基于黄河中游地区自然地理特征,根据修正后的价值当量(表1)和各土地利用类型面积计算得出区域内非建设用地的ESV。计算公式如下:

$$\mathrm{ESV_e}=\sum_{k=1}^{n}A_k\times E_k\times Q \tag{2}$$

式中,$\mathrm{ESV_e}$为非建设用地的生态系统服务总价值(元);A_k代表不同用地类型的面积(hm^2);E_k为单位面积某地类提供的生态系统服务价值(元/hm^2),k为土地类型,Q为价值修正系数。

(2)　建设用地ESV计算

建设用地的存在和发展需要依赖生态系统[28],并通过排放废水、废气和固体废物对ESV产生负面影响[29]。采用Zhao等[30]的方法估算供水、天然气调控和环境净化等生态系统服务功能,确定研究区建设用地单位面积ESV。

第一部分是水资源供给值的计算:

$$\mathrm{CV_w}=\frac{-(C_W+WP_W)}{\mathrm{A}} \tag{3}$$

式中,$\mathrm{CV_w}$为单位面积建设用地供水量值,C_W为污水处理成本,W为总水量,P_W为供水单价,A为建设用地面积。

第二部分是气体调节值的计算:

$$\mathrm{CV_g}=-\frac{c_q}{\mathrm{A}} \tag{4}$$

式中,$\mathrm{CV_g}$为单位面积建设用地的气体调节值,c_q为处理废气的成本。

第三部分是环境净化值的计算:

$$\mathrm{CV_c}=-\frac{C_r+C_c}{\mathrm{A}} \tag{5}$$

式中,$\mathrm{CV_c}$为单位面积建设用地的环境净化价值,C_r为生活垃圾处理成本,C_c为工业垃圾处理成本。

综上所述,建设用地($\mathrm{ESV_c}$)的生态系统服务价值可表示为:

$$\mathrm{ESV_c}=\mathrm{CV_w}+\mathrm{CV_g}+\mathrm{CV_c} \tag{6}$$

通过计算得到黄河流域中游ESV单位面积的

最终值如表1所示。

表1 单位面积生态系统服务价值当量

Table 1 The equivalent value of ecosystem services per unit area 元/hm²

一级类型 Primary type	二级类型 Secondary type	耕地 Cultivated land	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Water area	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land
供给服务 Provisioning services	食物生产	1 008.59	299.61	276.87	1 554.42	0	11.87
	原料生产	474.63	688.22	407.39	866.20	0	35.60
	水资源供给	23.73	355.97	225.45	15 473.00	−127 956.73	23.73
调节服务 Regulating services	气体调节	795.01	2 263.40	1 431.81	3 381.75	−3 184.33	154.26
	气候调节	427.17	6 772.40	3 785.19	7 629.71	0	118.66
	净化环境	118.66	1 984.55	1 249.86	11 047.06	−176.51	1 673.08
	水文调节	320.38	4 431.88	2 772.64	158 527.06	0	284.78
支持服务 Supporting services	土壤保持	1 222.18	2 755.83	1 744.27	3 844.52	177.99	177.99
	维持养分循环	142.39	210.62	134.48	296.64	0	11.87
	生物多样性	154.26	2 509.62	1 586.06	12 376.03	166.12	166.12
文化服务 Cultural services	美学景观	71.19	1 100.55	700.08	7 961.95	71.20	71.19

1.3.3 XGBoost

XGBoost(Extreme Gradient Boosting)是一种建立在梯度提升决策树(GBDT)框架基础上的优化机器学习方法,根据不断轮次纠正误差,实现对真实分布的模拟。XGBoost的目标函数由损失函数和正则化项2部分组成[16]。

已知训练数据集 $T=\{(x_1,y_1),(x_2,y_2),\cdots\cdots,(x_n,y_n)\}$,损失函数 $l(y_i,\hat{y}_i)$,正则化项 $\Omega(f_k)$,则整体目标函数可标记为:

$$L(\varnothing)=\sum_i l(y_i,\hat{y}_i)+\sum_k \Omega(f_k) \tag{7}$$

式中,$L(\varnothing)$表示线性空间上的表达,i表示第i个样本,k表示第k棵树,$\hat{y}_i$表示第i个样本x_i的预测值。

为了优化目标函数,采用二阶泰勒展开,去除常数项,优化损失函数项;正则化展开,去除常数项,优化正则化项,目标函数进一步简化为:

$$\mathcal{L}^{(t)}=\sum_{i=1}^{n}\left[g_i f_t(x_i)+\frac{1}{2}h_i f_t^{\,2}(x_i)\right]+\Omega(f_k) \tag{8}$$

式中,g_i表示数据点在损失函数上的一阶导数;h_i表示数据点在损失函数上的二阶导数。

1.3.4 SHAP

通过结合SHAP方法[31],可以深入解析模型的预测过程,了解特征对预测结果的贡献。SHAP值算法弥补了XGBoost模型难以解释因素变化对结果影响的不足,能够有效解释机器学习预测结果,量化各影响因素对ESV变化的重要性及作用方向。对于一个包含n个特征的模型,特征i的Shapley值计算公式为:

$$\varphi_i=\sum_{S\subseteq N\setminus\{i\}}\frac{|S|!(n-|S|-1)!}{n!}\big(v(S\cup\{i\})-v(S)\big) \tag{9}$$

式中,$N=\{1,2,\cdots,n\}$表示所有特征的集合,S中特征组合对应的模型预测值。S表示子S的元素个数,$v(S)$表示1个函数,表示子集S中特征组合对应的模型预测值。

1.3.5 精度评估

通过决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和平均绝对误差(MAE)评价XGBoost建模精度。相关计算公式参考吴雪等[32]的方法。

2 结果与分析

2.1 土地利用变化时空动态分析

2.1.1 土地利用动态度

2000-2023年,黄河流域中游土地利用类型以

耕地、草地和林地为主。其中,耕地面积占总面积为34.96%、草地为35.57%、林地为20.95%。利用动态度公式可得出6种土地利用类型的单一动态度和综合动态度(图1)。

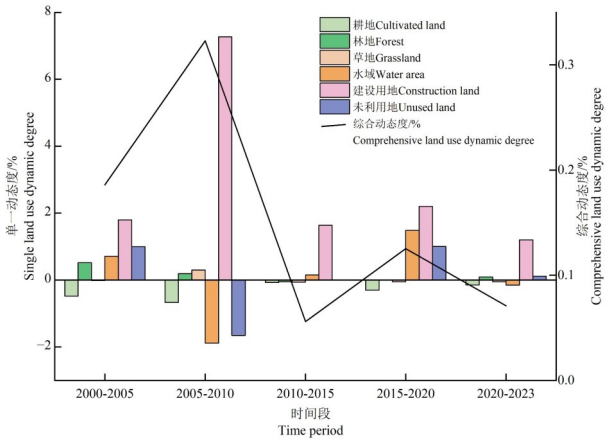

图1　2000-2023年黄河流域中游土地利用动态度

Fig.1　The dynamic degree of land use in the middle reaches of the Yellow River Basin from 2000 to 2023

2000-2023年,耕地和建设用地的单一动态度变化分别是-2.95%、1.90%,表明耕地面积不断减少,建设用地面积不断增加,二者分别是6大土地利用类型中负增长和正增长最高。在2000-2005、2005-2010阶段,耕地的单一动态度分别为-0.48%,-0.66%,绝对值最大,处在快速粗放减少阶段,虽然在2010年之后增至-0.07%,但是涨幅较少,后续年份中动态度仍小于0,说明耕地面临较大的胁迫;建设用地的单一动态度在2005-2010年间出现了突变且达到最大,其它阶段则差异较小,在研究期内需求呈现刚性的特征。在2005-2010年间建设用地的动态度出现强烈变化的原因与该地区在这一时期的快速城市化、基础设施建设以及政策推动等因素密切相关。

2000-2023年,综合土地动态度平均为0.15%。其中,2005-2010年间综合土地动态度值最大,为0.32%,表明此阶段土地之间变化很频繁,幅度大,对生态系统干扰较大。

2.1.2　土地转移矩阵分析

通过公式计算出土地利用转移情况,结果如图2所示。2000-2023年间,土地利用类型转化主要是耕地、林地和草地之间的互相转化。其中,转出面积最大的是耕地,为626 789 km^2;转入面积最大的是草地,达59 010.46 km^2。在研究期内,黄河流域中游土地利用类型变化幅度大,人类活动对建设用地和未利用地的开发强度高。

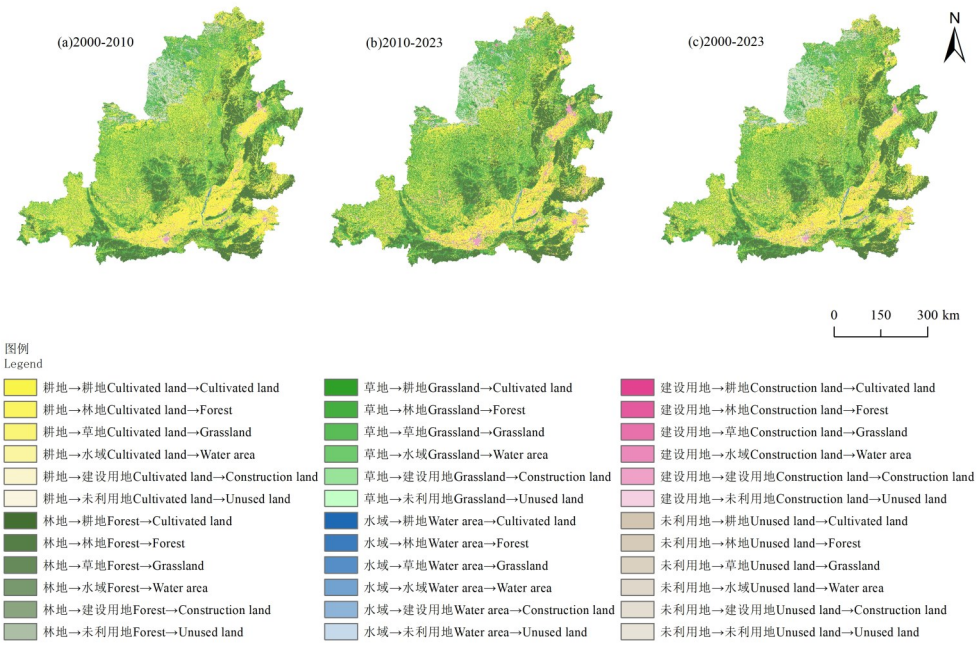

图2　2000-2023年黄河流域中游土地利用类型空间转移

Fig.2　Spatial shift of land use types in the middle reaches of the Yellow River Basin from 2000 to 2023

耕地是占比最大的土地利用类型,2000-2023年其面积占流域总面积的36.51%,其次为草地和林地,二者面积分别占34.18%和23.80%。耕地的土地利用类型转化较明显,其向林地和草地的转化集中在陕西省中部一带延川、延长和安塞区等县区,以及甘肃省南部和山西省北部的部分县区。耕地向建设用地的互相转化主要分布在晋中城市群、关中城市群和中原城市群。林地向草地的转化集中在陕西省内子午岭-黄龙山生态保护区和水源涵养区,以及山西省吕梁山、太行山中黄河及其支流流经处。2010-2023年与2000-2010年相比,耕地、林地向建设用地的转化更加明显,集中在陕西省西安市、河南省洛阳市以及山西省太原市中心城区等县区,并呈现向周围扩散趋势。未利用地和其它用地的转化集中于鄂尔多斯高原和晋、陕黄土高原的交界处。

2.2 黄河流域中游生态系统服务价值动态变化

2.2.1 时间演变特征

对黄河流域中游ESV进行测算(表2),2000-2023年,由于加入了建设用地ESV的变化量,黄河流域中游整体ESV呈现逐渐下降的变化特征,在2005-2010年间ESV的下降幅度最大,总计下降了747.19亿元。具体来看,24年来林地、草地和水域的ESV均有一定的波动增加,分别增加了89.95、20.35和11.65亿元;未利用地基本保持不变;而耕地和建设用地的ESV均逐渐下降,其中建设用地的ESV变化量和变化率均非常显著,为80.93%(-1 351.97亿元)。这源于我国经济发展后,基础设施建设逐渐完善,人民生活水平不断提高,人口也随之增长,因此建设用地增加而ESV减少。在2005-2010年间,我国工业化与城镇化进程不断推进,尤其在2008年全球金融危机爆发后,政府主要以基建投资为主导以对冲外部经济冲击,这引发了土地利用的显著变化。

由表3可以看出,黄河流域中游一级服务类型中,供给服务ESV呈逐年递减趋势,共下降1 337.95亿元,其中食物生产、原料生产和水资源供给的服务价值一直下降,说明在城市发展过程中,一直存在侵占耕地的现象。人类日常生活、设施建设和工业发展需消耗大量水资源,这导致二级服务水资源供给的ESV逐年下降,24年间下降了1 319.42亿元;调节服务和支持服务的ESV逐渐增长。调节服务价值占比80%以上,说明调节服务在黄河流域中游生态系统中占主导地位,其中水文调节和气候调节能够有效改善气候和植被情况,分别增加2 109.98亿元和1 596.28亿元;支持服务中,土壤保持和生物多样性占比较大,分别为54%和41%;文化服务的ESV呈现波动增加趋势,但基本保持不变。总体可得出,在黄河中游地区,水文调节的ESV占比最大,其对生态环境的改善有明显的驱动效应。

表2 2000-2023年黄河流域中游各类土地生态系统服务价值及变化

Table 2 Value and changes of rarious land ecosystem services in the middle reaches of the Yellow River Basin from 2000 to 2023

土地利用类型 Land use type	ESV/亿元						变化量/亿元 Change amount	变幅/% Change Range
	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2000-2023	2000-2023
耕地 Cultivated land	956.77	934.70	902.66	899.09	885.69	881.62	-75.15	-7.85
林地 Forest	2 601.01	2 660.77	2 689.11	2 683.00	2 679.92	2 690.96	89.95	3.46
草地 Grassland	2 573.21	2 573.11	2 611.83	2 604.77	2 599.53	2 593.56	20.35	0.79
水域 Water area	1 442.08	1 505.70	1 356.40	1 372.08	1 464.06	1 453.73	11.65	0.81
建设用地 Construction land	-1 670.55	-1 821.50	-2 450.81	-2 636.84	-2 915.39	-3 022.52	-1 351.97	80.93
未利用地 Unused land	41.49	43.29	39.68	39.70	41.74	41.88	0.39	0.94
合计 Total	5 944.01	5 896.07	5 148.88	4 961.81	4 755.55	4 639.22	-1 304.79	-21.95

2.2.2 空间演变特征

采用5 km×5 km的网格单元,将研究区划分16 368个网格点,并采用自然间断点分级法,将研究区内生态系统服务价值(ESV)的空间分布划分为5个等级,依次为低值区、较低值区、中值区、较高值区与高值区。计算黄河流域中游ESV,并利

表3　黄河流域中游单项生态系统服务价值时间变化

Table 3　Temporal changes in the value of individual ecosystem services in the middle reaches of the Yellow River Basin

一级服务 Primary services	二级服务 Secondary services	ESV/亿元 2000	2005	2010	2015	2020	2023
供给服务 Provisioning services	食物生产	296.16	292.69	285.96	285.09	282.76	281.86
	原料生产	251.41	251.23	249.35	248.67	247.48	247.19
	水资源供给	−1 447.61	−1 589.93	−2 214.59	−2 395.56	−2 661.65	−2 767.03
	供给服务总值	−900.04	−1 046.00	−1 679.28	−1 861.80	−2 131.41	−2 237.99
	供给服务占比/%	−15.14	−17.74	−32.61	−37.52	−44.82	−48.24
调节服务 Regulating services	气体调节	652.71	652.20	635.68	629.50	621.18	618.21
	气候调节	1 571.16	1 588.73	1 599.04	1 595.62	1 595.37	1 596.28
	净化环境	564.03	572.59	567.13	566.44	570.82	570.56
	水文调节	2 085.72	2 140.97	2 045.16	2 053.54	2 116.65	2 109.98
	调节服务总值	4 873.63	4 954.49	4 847.00	4 845.10	4 904.02	4 895.03
	调节服务占比/%	81.99	84.03	94.14	97.65	103.12	105.51
支持服务 Supporting services	土壤保持	895.84	898.63	896.50	894.53	892.18	891.69
	维持养分循环	78.34	78.31	77.76	77.55	77.21	77.11
	生物多样性	680.11	689.64	688.22	687.78	692.01	691.98
	支持服务总值	1 654.30	1 666.57	1 662.48	1 659.86	1 661.40	1 660.78
	支持服务占比/%	27.83	28.27	32.29	33.45	34.94	35.80
文化服务 Cultural services	美学景观	316.13	321.01	318.68	318.65	321.54	321.40
	文化服务占比/%	5.32	5.44	6.19	6.42	6.76	6.93
ESV总值 Total value of ESV		5 944.01	5 896.07	5 148.88	4 961.81	4 755.55	4 639.22

用ArcGIS10.8进行可视化表现。

如图3所示,2000-2023年间,黄河流域中游ESV主要呈现较低值区和中值区缩减,其余等级扩张的趋势,在空间上呈现由西北向东南逐渐递减的分布格局。其中,较低值区和中值区面积分别缩减了3.67%、1.69%,较高值区扩张4.07%,低值和高值区扩张不明显。低价值区面积较小,约占1.08%,在空间上零星分布,具体分布在研究区内的内蒙古南部、甘肃省东北部、陕西省南部、山西省中部和西南部的少部分地区,和较低价值区的空间位置重合;较低价值区主要集中在内蒙古高原与关中平原城市群,土地类型主要为建设用地和耕地,面积约占12.50%;中值区分布面积最广,约占56.51%,分布在黄土高原大部分地区,多为林地和草地;较高价值区域和高价值区域面积分别约占29.31%和0.60%,主要分布在黄土高原丘陵沟壑生态功能区与秦岭地区,土地利用类型以林地为主。较高值区和高值区大多降水丰富,气候温和,草地和林地生长茂盛,植被覆盖率高,生物多样性丰富;较低值区和低值区集中于内蒙古高原、黄土高原和关中平原,土质较好适宜耕作,能源资源丰富,人口集中,随着经济的快速发展,正面临较为突出的环境污染问题。

2.3　生态系统服务价值驱动因素分析

2.3.1　基于XGBoost的模型构建

ESV变化受到多种方面的影响,根据研究区实际状况及数据的可获得性,选择了平均高程(x1)、平均坡度(x2)、年平均气温(x3)、年平均降水量(x4)、归一化植被指数(NDVI)(x5)、林地占比(x10)等自然因素和夜间灯光亮度(x6)、人均GDP(x7)、人口密度(x8)、耕地占比(x9)等人为因素,将黄河流域中游ESV设定为因变量,可能的影响因素设定为自变量,数据进行标准化后通过机器学习算法识别各因素对ESV的影响程度和作用方向。

基于2000-2023年间黄河流域中游226个县区的数据,按照70%和30%的比例划分训练集和测试集,对LGB、RF和XGboost等常用的机器学习算法进行拟合训练。从表4可得,XGBoost算法取得了最小的RMSE(0.12)和MAE(0.07),以及最大的R^2(0.91),预测值与实际值最为接近,因此本研究采用XGBoost算法研究黄河流域中游ESV

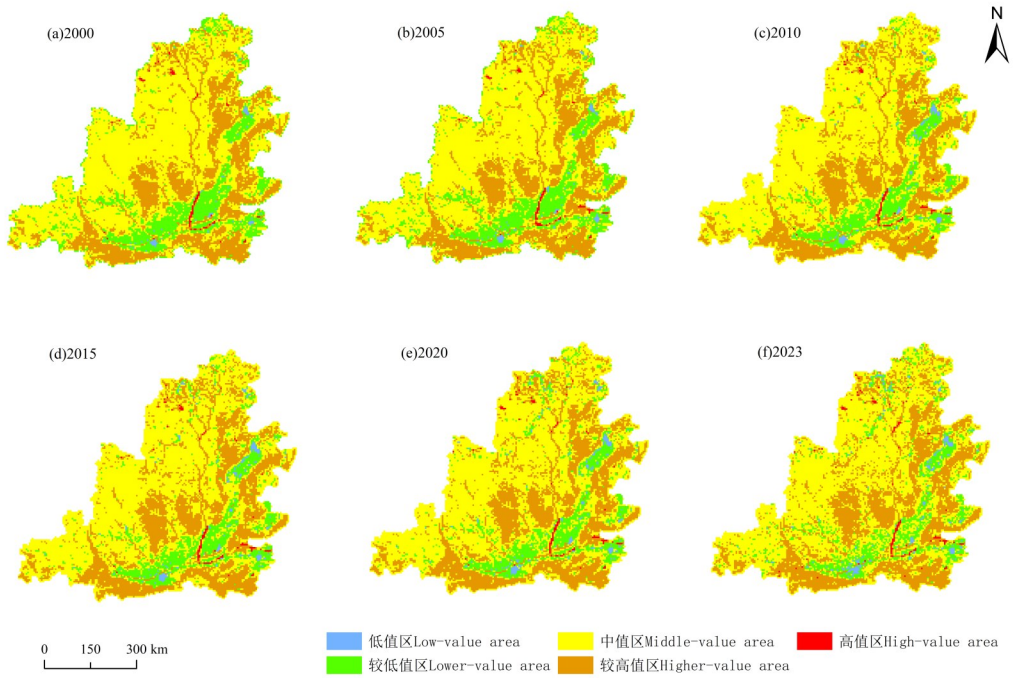

图3 2000-2023年黄河流域中游生态系统服务价值空间分布

Fig.3 Spatial distribution of ecosystem service value in the middle reaches of the Yellow River Basin from 2000 to 2023

表4 模型拟合训练结果对比

Table 4 Comparison of model fitting training results

项目 Item	R^2	RMSE	MAE
LGB	0.74	0.20	0.14
RF	0.73	0.21	0.15
XGBoost	0.91	0.12	0.07

变化的影响因素。

2.3.2 影响因素重要性分析

SHAP均值反映了各影响因素对耦合协调的贡献程度,是识别主要影响因素的重要手段。夜间灯光亮度客观反映了人类活动情况,是影响ESV变化的最主要因素,占比23.03%;耕地占比和人口密度也显著影响了黄河流域中游ESV的变化量,分别占比18.59%和17.98%。这表明人类活动对黄河流域中游的生态环境变化有重要作用。除夜间灯光亮度、耕地占比和人口密度外,其它影响因素按照重要性排序依次是平均坡度、平均高程、林地占比、人均GDP、年平均气温、归一化植被指数、年平均降水量(图4)。

尽管SHAP均值能够衡量各变量的相对重要性,但无法直观反映各变量的具体作用方向。因此,本研究进一步绘制SHAP可视化概要图。

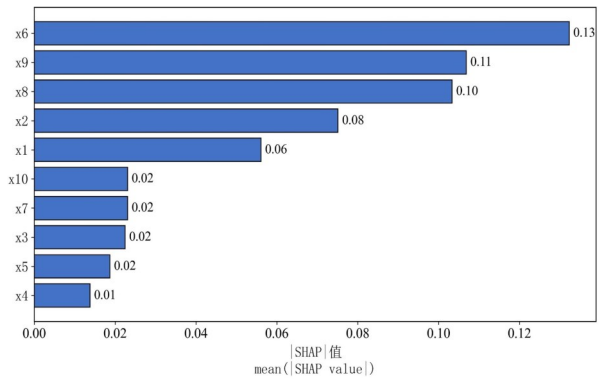

图4 平均影响因素排序图

Fig.4 Average ranking of influencing factors

由图5可以看出,平均坡度、林地占比和年平均气温的增加对ESV具有正向影响。我国退耕还林还草政策明令禁止对25°以上的坡地进行垦殖,这显著降低了相关区域的土壤侵蚀强度,并有效促进植被覆盖的恢复与生态功能的改善;茂密的植被根系和枯枝落叶层能有效拦截雨水、减缓径流、减少土壤侵蚀和保护水源,提升生物多样性。同时,林地增加能够改善局地气候,减轻水土流失和土地荒漠化问题,有助于区域内树苗存活率增加和优种培育,因此,林地占比面积增加对ESV有

促进作用;在2000-2023年间黄河流域中游的极端气温频率较低,气温整体呈现适度增加,这对植物生长季延长、植被覆盖度增加有重要作用。

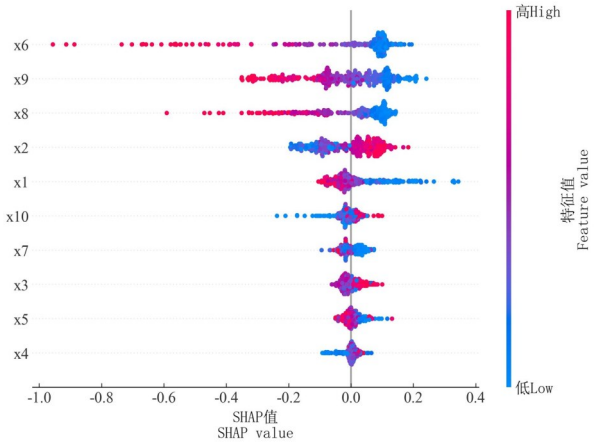

图5　影响因素SHAP值概要图

Fig.5　Summary of SHAP values for influencing factors

对ESV产生负向影响的因素主要有夜间灯光亮度、耕地占比和人口密度,三者能够在一定程度上表征人类活动强度。根据土地利用变化图和土地利用转移矩阵可知,24年间黄河流域中游土地利用类型变化幅度大,建设用地开发面积大。建设用地扩张是城市化进程的核心标志,但其对ESV的负面影响显著且连续。高强度的开发建设会驱动土地利用的变化,尤其是耕地、林地、草地等向建设用地的转化,这可能会导致ESV的大幅减少。除此以外,平均高程和归一化植被指数对ESV也有一定的抑制作用。区域的平均高程较低时对ESV仍有正向影响,但随着高度的增加,水热条件和植被覆盖程度发生变化,导致ESV减少。

3　讨论

3.1　土地利用变化

2000-2023年,黄河流域中游土地利用类型以耕地、草地和林地为主。耕地和建设用地的单一动态度变化分别是6大土地利用类型中负增长和正增长最高,这表明耕地面积不断减少,建设用地面积不断增加,与高萌萌等[33]的研究结果一致;2005-2010年间,土地类型变化非常频繁。原因在于该研究时段期间我国正逐步进入工业化加速发展期、城市化快速成长期,土地利用类型的变化速率受到了明显影响。

土地利用类型转化主要是耕地、林地和草地之间的互相转化。其中,转出面积最大的是耕地,转入面积最大的是草地。在研究期内,黄河流域中游土地利用类型变化幅度大,人类活动对建设用地和未利用地的开发强度高。分析黄河中游地区土地利用变化与ESV变化之间的作用关系可得出,2005-2015年间由于城镇建设用地迅速扩张和煤矿资源的大规模开采导致植被减少,ESV持续下降,但随着后续生态修复工程和环境保护政策的推进使区域生态环境质量有了明显改善。未来应注重提升林地、草地与水体的生态功能,合理调控未利用地的开发方式。

3.2　考虑或不考虑建设用地对ESV的影响

在现有的基于等效因子法的ESV评价研究中,许多学者遵循谢高地等[27]的研究,并未单独确定建设用地的价值。但随着社会经济发展和建设用地迅速扩张,其对生态环境的负面影响不容小觑。根据牛璐等[34]的研究可得出,在不考虑建设用地时,黄河流域中游ESV在2000-2023年呈波动上升趋势,从7 132.63亿元增加到7 185.46亿元。考虑建设用地时,总体ESV从5 944.01亿元下降至4 639.22亿元。从结果可以看出,建设用地对生态环境的负面影响明显;在不同的服务类型中,不考虑建设用地时,供给服务下降幅度较小,在24年间只减少了19.12亿元,但在考虑建设用地的情况下,供给服务出现较大幅度的下降,总计下降1 337.95亿元,其中水资源供给服务的贡献度最大。在调节和支持服务的情况下,考虑建设用地时评估的价值高于不考虑建设用地的价值。此外,在2种情景中,文化服务的价值相对接近。

可以看出,建设用地的扩张对于当地生态系统有着显著影响,进行合理的空间规划对于保护当地的植被、土壤和水资源具有重要意义。在治理过程中,应当着重考虑社会经济发展与生态环境保护之间的平衡,同时贯彻国家政策,对水资源等资源采取合理的管理措施,以实现该地区社会、经济和生态的和谐与可持续发展。

3.3　ESV的驱动因素可视化

本文运用XGBoost-SHAP模型对黄河流域中游的生态系统服务的驱动因素进行了分析。结果显示,该模型在训练集和测试集上均展现出良好

的性能,预测效果显著,且SHAP值能够清晰地揭示各驱动因素的相对重要性。影响因素按照重要性排序依次是夜间灯光亮度、耕地占比、人口密度、平均坡度、平均高程、林地占比、人均GDP、年平均气温、归一化植被指数、年平均降水量。在自然因素方面,平均坡度、林地占比和年平均气温对ESV具有正向影响。退耕还林还草政策使坡度较高的地区受到的人为活动破坏较少,相较缓坡地区ESV较高,这与李薇[35]的研究成果相一致;林地占比也对ESV有重要影响,这体现了土地利用类型的变化对生态系统环境的促进作用;在研究时段内,黄河流域中游气温整体呈现适度增加,这对植物生长季延长、植被覆盖度增加有重要作用,这与徐晓彤[36]的研究结果相一致;而平均高程和归一化植被指数对ESV有一定的抑制作用。区域的平均高程较低时对ESV仍有正向影响,但随着高度的增加逐渐导致ESV减少,这主要是因为黄河中游流经黄土高原的核心区域,随着海拔的升高,气温与降水随之下降,植被覆盖率减少,这与马帅等[37-38]的研究结果一致。

在人类活动因素方面,夜间灯光亮度对ESV的负面影响尤为显著,这与黄河流域中游快速城市化过程中人类活动的高强度干扰有关[39],规划者应适当调整城市布局,重点加强生态廊道和景观斑块的连通性,倡导低碳生活方式,促进城市生态系统恢复和可持续发展。

4 结论

本文以黄河流域中游为研究区域,分析了2000-2023年研究县区的土地利用变化,并基于修正后的当量因子法构建包含建设用地的ESV估值模型,分析黄河流域中游各县域的ESV时空变化,并运用XGBoost-SHAP模型对ESV的驱动因素可视化分析。主要结论如下:

(1)2000-2023年,黄河流域中游的土地利用类型以耕地、草地和林地为主,其面积分别占总面积的34.96%、35.57%和20.95%。耕地和建设用地的单一动态度变化最为显著,分别是-2.95%、1.90%,是6大土地利用类型中负增长和正增长最高;综合土地动态度平均为0.15%,其中,2005-2010年间综合土地动态度值最大,达到0.32%。土地利用类型转化主要是耕地、林地和草地之间的互相转化,转出面积最大的是耕地,为626 789km^2;转入面积最大的是草地,达59 010.46km^2。

(2)2000-2023年,黄河流域中游整体ESV呈现逐渐下降的变化特征,总计减少了21.95%;从空间上看,黄河流域中游ESV较低值区和中值区缩减,其余等级扩张的趋势,呈现由西北向东南逐渐递减的分布格局。其中,较低值区和中值区面积分别缩减了3.67%、1.69%,较高值区扩张4.07%,低值和高值区扩张不明显。

(3)黄河流域中游ESV受到自然和人为因素的影响。其中,夜间灯光亮度是影响ESV变化的最主要因素,影响占比为23.03%。平均坡度、林地占比和年平均气温对ESV具有正向影响,夜间灯光亮度、耕地占比、人口密度和平均高程产生负向影响,其它因素影响较小。

参 考 文 献

[1]Shen W, Li Y, Qin Y C. Research on the influencing factors and multi-scale regulatory pathway of ecosystem health: a case study in the Middle Reaches of the Yellow River, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 406: 137038.

[2]Guo L, Huang J F, Zhang X Q, et al. LUCC-based analysis of ecosystem service value drivers in the South-North Water Transfer Central Line recharge area[J]. Environmental Earth Sciences, 2023, 82: 289.

[3]黄智洵,王飞飞,曹文志. 耦合生态系统服务供求关系的生态安全格局动态分析——以闽三角城市群为例[J]. 生态学报,2018,38(12):4327-4340.
Huang Z X, Wang F F, Cao W Z. Dynamic analysis of an ecological security pattern relying on the relationship between ecosystem service supply and demand: a case study on the Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou city cluster[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4327-4340.

[4]李双成,张才玉,刘金龙,等. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题[J]. 地理研究,2013,32(8):1379-1390.
Li S C, Zhang C Y, Liu J L, et al. The tradeoffs and synergies of ecosystem services: research progress, development trend, and themes of geography[J]. Geographical Research, 2013, 32(8): 1379-1390.

[5]张欣蓉. 西南喀斯特区生态系统服务权衡与供需平衡分析[D]. 西安:长安大学,2020.
Zhang X R. Analysis of ecosystem service trade-offs and supply-demand balance in Karst area of southwest China[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.

[6]杨舒媛,李子君. 土地利用变化背景下沂河流域生态系统服务价值时空格局演化[J]. 环境科学,2024,45(8):4722-4732.
Yang S Y, Li Z J. Spatio-temporal pattern of ecosystem service value evolution in the Yihe River Basin in the context of land use change[J]. Environmental Science, 2024, 45(8): 4722-4732.

[7]朱俊俊,高周冰,王君橹,等. 南京都市圈生态系统服务时空变化及权衡协同关系[J]. 水土保持研究,2023,30(3):383-394.
Zhu J J, Gao Z B, Wang J X, et al. Spatiotemporal changes and trade-off/synergy relationship of ecosystem services in Nanjing metropolitan area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 383-394.

[8]赵慧. 基于XGBoost-SHAP模型的北京市生态系统服务空间格局及驱动因素分析[EB/OL]. 环境科学: 1-16(2025-04-24)[2025-08-15]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202501166.
Zhao H. Analysis of spatial patterns and driving factors of ecosystem services in Beijing based on XGBoost-SHAP model [EB/OL]. Environmental Science: 1-16 (2025-04-24) [2025-09-27]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202501166.

[9]徐铭璟,段宝玲,冯强,等. 生态系统服务及其权衡/协同关系多情景模拟——以黄河流域山西段为例[J]. 干旱区地理,2025,48(7):1206-1219.
Xu M J, Duan B L, Feng Q, et al. Ecological services and their trade-offs/synergistic relationships in multiscenario simulations: a case of the Shanxi section of the Yellow River Basin[J]. Arid Land Geography, 2025, 48(7): 1206-1219.

[10]闫语,秦耀伟,东嘉琪,等. 京津冀地区生态系统服务权衡与协同关系及驱动因素分析[J]. 环境科学学报,2025,45(3):493-506.
Yan Y, Qin Y W, Dong J Q, et al. Analysis on ecosystem service trade-offs/synergies and drivers in BeijingTianjin-Hebei region [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2025, 45 (3): 493-506.

[11]郭荣中,申海建,张阔,等. 长株潭城市群生态系统服务变化及其权衡协同研究[J]. 水土保持研究,2025,32(4):365-374.
Guo R Z, Shen H J, Zhang K, et al. Ecosystem services and their trade-offs and synergies in Chang-Zhu-Tan urban agglomeration[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(4): 365-374.

[12]任万杰. 基于XGboost-SHAP模型汉江流域生态系统服务权衡与协同及驱动力分析[EB/OL]. 中国农村水利水电: 1-18 (2025-05-15) [2025-08-15]. https://link. cnki. net/urlid/42.1419.TV.20250515.0943.008.
Ren W J. Trade-offs, synergies and driving force analysis of ecosystem services in the Hanjiang River Basin based on the XGboost-SHAP model [EB/OL]. China Rural Water and Hydropower: 1-18 (2025-05-15) [2025-08-15]. https://link.cnki.net/urlid/42.1419.TV.20250515.0943.008.

[13]胡和兵,申雪萌,黄智祥,等. 皖北粮食主产区生态系统服务权衡与协同作用强度及其驱动因素[J]. 水土保持通报,2025,45(2):383-396.
Hu H B, Shen X M, Huang Z X, et al. Trade-offs and synergy intensity among ecosystem services and driving factors in main grain-producing areas of Northern Anhui Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45 (2): 383-396.

[14]李茂娟,李天奇,朱连奇,等. 基于袋状图和相关系数的太行山地生态系统服务权衡/协同关系[J]. 生态学报,2025,45(13): 6512-6523.
Li M J, Li T Q, Zhu L Q, et al. The trade-offs and synergistic relationships among ecosystem services based on bagplots and correlation coefficients: a case study in Taihang Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(13): 6512-6523.

[15]Liu H, Zheng L, Wu J, et al. Past and future ecosystem service trade-offs in Poyang Lake Basin under different land use policy scenarios[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13 (2): 46.

[16]吴迪,杜宁,王莉,等. 基于GTWR-XGBoost模型的四川省$PM_{2.5}$小时浓度估算[J]. 环境科学,2023,44(7):3738-3748.
Wu D, Du N, Wang L, et al. Estimation of $PM_{2.5}$ hourly concentration in Sichuan Province based on GTWR-XGBoost model[J]. Environmental Science, 2023, 44(7): 3738-3748.

[17]杨军军,罗谦,樊云. 西安市植被覆盖度与城市地表温度的关系研究[J]. 地理空间信息,2022,20(1):89-90, 100.
Yang J J, Luo Q, Fan Y. Research on the relationship between vegetation coverage and urban surface temperature in Xi'an city [J]. Geospatial Information, 2022, 20 (1): 89-90, 100.

[18]李慧,余明. 基于决策树模型的湿地信息挖掘与结果分析[J]. 地球信息科学,2007,9(2):60-64,73.
Li H, Yu M. Wetland information extraction based on decision tree model [J]. Geo-information Science, 2007, 9 (2): 60-64,73.

[19]Zhang Q, Cheng J, Wang N L. Fusion of all-weather land surface temperature from AMSR-E and MODIS data using random forest regression [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021, 19: 2502705.

[20]Cao J, Tao T. Using machine-learning models to understand nonlinear relationships between land use and travel [J]. Research Part D: Transport and Environment, 2023, 123: 103930.

[21]Vega García M, Aznarte J L. Shapley additive explanations for NO_2 forecasting [J]. Ecological Informatics, 2020, 56: 101039.

[22]李魁明,王晓燕,李婷婷,等. 黄河中游地区生态系统健康及其影响因子分析[J]. 环境科学,2025,46(8):5145-5155.
Li K M, Wang X Y, Li T T, et al. Analysis of ecosystem health and its influencing factors in the middle reaches of the Yellow River[J]. Environmental Science ,2025,46(8):5145-5155.

[23]王争磊,乔家君,刘海龙,等. 黄河中游地区生态安全格局时空演变及优化策略[J]. 农业工程学报,2024,40(19):231-239.
Wang Z L, Qiao J J, Liu H L, et al. Spatio-temporal evolution and optimization strategy of ecological security pattern in the Middle Reaches of the Yellow River of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40 (19): 231-239.

[24]Yang S, Zhang W, Zhang J Y, et al. The coupling relationship and driving mechanism between ecological environment and high-quality economic development in the Middle Yellow River Basin[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 10688.

[25]Qiu H, Hu B Q, Zhang Z. Impacts of land use change on ecosystem service value based on SDGs report-Taking Guangxi as an example[J]. Ecological Indicators, 2021, 133:

108366.

[26]Wu C Y, Chen B W, Huang X J, et al. Effect of land-use change and optimization on the ecosystem service values of Jiangsu province, China[J]. Ecological Indicators, 2020, 117: 106507.

[27]谢高地,张彩霞,张雷明,等. 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[J]. 自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.
Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1243-1254.

[28]丛佳敏,孙从建,陈伟,等. 2000—2020年间黄河中游不同地貌区城镇建设用地扩张过程及其影响因素[J]. 地理研究,2024,43(8):2121-2140.
Cong J M, Sun C J, Chen W, et al. Unrevealing the process and driving factors of urban construction land expansion in the middle reaches of the Yellow River, 2000-2020 [J]. Geographical Research, 2024, 43(8): 2121-2140.

[29]胡赛. 基于土地利用变化的生态系统服务价值及生态补偿标准研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2020.
Hu S. Research on ecosystem service value and ecological compensation standard based on land use change[D], Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.

[30]Zhao F, Zhang X W, Wu Q R, et al. Characteristics of spatial and temporal changes in ecosystem service value and threshold effect in Henan along the Yellow River, China[J]. Ecological Indicators, 2024, 166: 112531.

[31]Lundberg S, Lee S I. A unified approach to interpreting model predictions[C]. NIPS'17: Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems, Long Beach: Curran Associates Inc., 2017, 4768-4777.

[32]吴雪,张显云,龙安成,等. 采用XGBoost+SHAP揭示贵阳市地表温度的驱动力因子[J]. 环境科学与技术,2024,47(8):155-166.
Wu X, Zhang X Y, Long A C, et al. Revealing the drivers of land surface temperature variation in Guiyang City using XGBoost and SHAP [J]. Environmental Science & Technology, 2024, 47(8): 155-166.

[33]高萌萌,杨楠,王轶,等. 黄河流域生态系统服务价值时空变化特征[J]. 地质通报,2025,44(S1):353-363.
Gao M M, Yang N, Wang Y, et al. Temporal and spatial variation characteristics of ecosystem service value in the Yellow River Basin[J]. Geological Bulletin of China, 2025, 44(S1): 353-363.

[34]牛璐,向燕芸,张齐飞,等. 2000年以来黄河中游地区土地利用与生态系统服务价值时空分异特征[J]. 水土保持研究,2025,32(5):435-443.
Niu L, Xiang Y Y, Zhang Q F, et al. Spatiotemporal differentiation characteristics of land use and ecosystem service value in middle reaches of Yellow River since 2000 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(5): 435-443.

[35]李薇,谈明洪. 太行山区不同坡度NDVI变化趋势差异分析[J]. 中国生态农业学报,2017,25(4):509-519.
Li W, Tan M H. NDVI variation tendency under different slopes in Taihang Mountain [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(4): 509-519.

[36]许晓彤. 黄河流域生态系统服务价值评估与生态安全格局构建研究[D]. 济南:山东师范大学,2023.
Xu X T. Assessment of ecosystem service value and construction of ecological security pattern in Yellow River Basin [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2023.

[37]马帅. 植被变化对生态系统服务的影响阈值及地形梯度效应[D]. 南京:南京林业大学,2022.
Ma S. Threshold and terrain gradient effects of vegetation change on ecosystem services[D]. Nanjing, Nanjing Forestry University, 2022.

[38]Feng Q, Zhao W W, Fu B J, et al. Ecosystem service trade-offs and their influencing factors: a case study in the Loess Plateau of China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 607-608: 1250-1263.

[39]Fang L L, Wang L C, Chen W X, et al. Identifying the impacts of natural and human factors on ecosystem service in the Yangtze and Yellow River Basins[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 314: 127995.

(编辑:郭玥微)