黄河流域内蒙古段土地利用和生态系统服务价值时空演变及模拟预测

蒙苏迪，赵红霞
（内蒙古农业大学 林学院，内蒙古 呼和浩特 010019）

摘　要：［目的］对黄河流域土地利用和生态系统服务价值时空演变进行分析及模拟预测，为黄河流域生态保护和高质量发展提供科学支撑。［方法］以黄河流域内蒙古段为研究对象，基于1990—2023年土地利用数据，采用多维度分析方法，结合土地利用动态变化与空间转移矩阵，运用价值当量评估体系量化区域生态系统服务价值（ESV），并通过生态贡献率揭示不同土地利用类型与ESV之间的相互作用关系。同时，借助intPLUS模型模拟了2035年自然发展、耕地保护、生态保护与城镇发展4种情景下的土地利用格局及ESV演变趋势。［结果］①草地与未利用地是黄河流域内蒙古段的主要土地利用类型，建设用地与林地面积持续增加，未利用地、耕地及水域面积呈下降态势。土地利用类型转变总面积达47 272.91 km^2，转出强度最高的地类分别为水域、林地、建设用地；草地是转入规模最大的地类。②1990—2023年研究区ESV小幅下降（0.85%），草地为核心贡献类型，空间呈“东北部高，西部区低”格局，各阶段ESV变化率的高值区与低值区空间集聚程度明显。③2035年4种情景模拟中，仅生态保护情景可实现ESV增长，城镇发展情景下ESV损失最为显著；草地ESV变化主导整体趋势。［结论］黄河流域内蒙古段2035年最优发展路径为坚持生态优先，严格管控城镇无序扩张，推进草地等核心生态用地修复，实现土地利用与生态保护的协同发展。

关键词：土地利用变化；生态系统服务价值；intPLUS模型；多情景模拟；黄河流域内蒙古段
文献标识码：B　　**文章编号：**1000-288X（2026）03-0342-15　　**中图分类号：**F301，X171

文献参数：蒙苏迪，赵红霞.黄河流域内蒙古段土地利用和生态系统服务价值时空演变及模拟预测[J].水土保持通报，2026，46（3）：342-356. Meng Sudi，Zhao Hongxia. Spatiotemporal evolution and simulation prediction of land use and ecosystem service value in Inner Mongolia section of Yellow River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2026，46（3）：342-356.

DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.022　　**CSTR：32312.14.stbctb.2026.03.022**

Spatiotemporal evolution and simulation prediction of land use and ecosystem service value in Inner Mongolia section of Yellow River basin

Meng Sudi，Zhao Hongxia
（*College of Forestry*，*Inner Mongolia Agricultural University*，*Hohhot*，*Inner Mongolia* 010019，*China*）

Abstract：［Objective］The spatiotemporal evolution of land use and ecosystem service value in the Yellow River basin was analyzed and simulated in order to provide scientific support for ecological protection and high-quality development of the basin.［Methods］Taking the Inner Mongolia section of the Yellow River basin as the research object，and based on land use data from 1990 to 2023，a multi-dimensional analysis method was adopted. By combining land use dynamic changes with the spatial transfer matrix，the regional ecosystem service value（ESV）was quantified using the value equivalent assessment system，and the interaction between different land use types and ESV was revealed through the ecological contribution rate. Meanwhile，the intPLUS model was used to simulate the land use pattern and ESV evolution trend under four scenarios in 2035：natural development，cultivated land protection，ecological protection，and urban development.［Results］① Grassland and unused land

收稿日期：2025-11-20　　**修回日期：**2026-01-05　　**采用日期：**2026-01-05
资助项目：内蒙古自治区高等学校科学研究项目“三生空间”耦合机制下内蒙古沿黄地区旅游型乡村生态空间重构分析”（NJZY22503）；内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目（BR230218）
第一作者：蒙苏迪（2000—），女（蒙古族），内蒙古自治区巴彦淖尔市人，硕士研究生，研究方向为土地资源利用与生态环境管理。Email：13214781799@163.com。
通信作者：赵红霞（1980—），女（汉族），内蒙古自治区呼和浩特市人，副教授，硕士生导师，主要从事土地资源利用与乡村景观设计方面的研究。Email：zhxzhenli@126.com。

were the main land use types in the Inner Mongolia section of the Yellow River basin. The areas of construction land and forestland increased continuously, while the areas of unused land, cultivated land, and water bodies showed a decreasing trend. The total area of land use type conversion reached 47 272.91 km^2. The land use types with the strongest outward transfer were water bodies, forestland, and construction land, while grassland had the largest inward transfer. ② From 1990 to 2023, the ESV in the study area decreased slightly by 0.85%, with grassland as the core contribution type. Spatially, it showed a pattern of "high in the northeast and low in the west", and the spatial agglomeration of high-value and low-value areas of ESV change rate was obvious in each stage. ③ Among the four scenario simulations for 2035, only the ecological protection scenario could achieve ESV growth, while the ESV loss was the most significant under the urban development scenario. The change in grassland ESV dominated the overall trend. [Conclusion] The optimal development path in 2035 is to adhere to ecological priority, strictly control the disorderly expansion of urban areas, promote the restoration of core ecological land such as grassland, and realize the coordinated development of land use allocation and ecological protection.

Keywords: land use change; ecosystem service value; intPLUS model; multi-scenario simulation; Inner Mongolia section of Yellow River basin

生态系统服务(ecosystem services, ES)是自然生态系统依托自身结构、过程与功能为人类提供的各类惠益,而生态系统服务价值(ecosystem service value, ESV)则是对这类惠益的经济量化表达,其动态演变与人类生存发展福祉直接相关[1]。土地利用变化(land use/cover change, LUCC)作为驱动ESV演变的核心因子,二者存在复杂的耦合反馈关系。一方面,LUCC借助调整生态系统的空间结构,对气候调节、水文循环、土壤养分循环等核心生态过程产生影响,使ES的供给水平发生变化[2-3];另一方面,ESV的变化会通过反馈机制影响土地利用的效率,从而限制或引导土地利用结构的调整。LUCC和ESV之间的相互作用关系已经受到学界的广泛关注[4]。因此,量化LUCC过程中ESV的时空分异特征,揭示二者相互作用机理,引入相互作用网络-斑块生成土地利用模拟软件模型(intPLUS模型)解析预测,探索未来情景下ESV的演变趋势,是优化国土空间规划,制定差异化生态保护策略,构建区域生态安全格局的关键科学基础。

当前,ESV评估已形成较为完善的理论与方法体系。Costanza等[1]于1997年首次基于LUCC数据,采用当量因子法构建全球ESV评估框架;谢高地等[5-7]结合中国生态系统特征,多次修正当量因子系数,建立符合中国区域特点的ESV评估体系,为后续研究提供核心方法支撑。在此基础上,学界围绕LUCC与ESV的响应关系展开多维度探索,在方法层面形成空间分析与地理探测器、生态贡献率、ESV流向分析等技术路径,在研究尺度上覆盖流域、生态敏感区、经济发达城市群等区域。ESV的核算方法主要包括两类核心路径:其一为单位面积服务功能价值法,通过量化生态系统单项服务的实际经济价值实现核算;其二是单位面积价值当量因子法,基于标准化的价值当量系数完成区域ESV的综合评估。LUCC是驱动ESV时空演变的关键载体,引入土地利用模拟模型解析并预测未来用地格局,不仅为区域土地资源可持续管理与国土空间规划提供了科学支撑[8],更为探索未来情景下ESV的演变趋势与驱动机制开辟了新的研究视角。现有研究已依托PLUS模型[9]、FLUS模型[10]、CA-Markov模型等[11]主流工具,多尺度开展LUCC与ESV耦合模拟研究。梁迅于2025年开发的全新intPLUS模型[12],通过挖掘土地利用相互作用网络,有效量化用地类型间的驱动与抑制效应,显著提升了未来情景下土地利用格局模拟的精度。郭兰博等[13]将其应用于河南省资源型城市的土地利用与ESV预测,验证了该模型在识别用地边界动态与景观演变驱动因子方面的优势,为ESV情景预测研究提供了有效工具。然而,现有研究对黄河流域内蒙古段这类干旱半干旱过渡区的关注仍显不足,针对该区域长时序土地利用/覆盖变化(LUCC)与ESV演变的系统性分析较为缺乏,且运用intPLUS模型进行多情景ESV预测的研究尚属空白,难以支撑区域差异化生态管控政策的制定。鉴于此,本研究聚焦黄河流域内蒙古段,依托intPLUS模型开展系统性探究。

黄河流域内蒙古段(乌海、巴彦淖尔、包头、呼和浩特、鄂尔多斯)兼具干旱半干旱气候特征与能源基地、农业主产区的双重属性,是黄河流域生态保护和高质量发展的关键区域。为落实国家《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》与《内蒙古自治区黄河流域国土空间规划(2021—2035年)》要求,需统筹生态安全与经济社会发展,推动土地利用优化与ESV协同提升。本研究基于1990—2023年土地利用与社会

经济数据，综合运用土地利用动态度、转移矩阵及当量因子法，系统揭示该区域土地利用与ESV的时空演变规律，并解析土地利用变化对ESV的影响机制。进一步通过intPLUS模型构建自然发展、耕地保护、生态保护与城镇发展4类情景，模拟预测2035年不同发展路径下的土地利用转型及其ESV响应。本研究旨在拓展黄河流域内蒙古段ESV研究的理论与方法体系，为协调区域生产活动与生态保护提供科学依据，助力黄河流域生态保护和高质量发展战略的实施。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河流域内蒙古段（37°35′—42°28′N，105°12′—112°10′E）地处内蒙古自治区中南部，流经乌海市、巴彦淖尔市、鄂尔多斯市、包头市和呼和浩特市5个城市。黄河自巴彦淖尔市和乌海市进入内蒙古自治区，最终从鄂尔多斯市准格尔旗流出，境内河道全长约740 km，流域面积约1.52×10^5 km^2，占黄河流域总面积的19.1%，属于黄河上游与中游的过渡区段，是黄河全长的1/6，流域内有高原、平原、盆地、山地、沙漠、戈壁等多种地貌，气候特征为干旱少雨，年均降水量介于150～400 mm，集中在6—8月，潜在蒸散量超过2 000 mm；年均气温在6.6 ℃左右。2023年区域常住人口约1 250万人，GDP总量达1.86×10^{12}元。黄河流域内蒙古段是经济发展的核心主轴与战略发展支撑区域。近年来，在快速城镇化与工业化驱动下，区域土地利用格局发生剧烈变化，突出表现为草地退化、建设用地扩张及沙漠化加剧。同时，该区域正积极发展光伏、氢能等新能源产业，进一步加剧了人类活动对生态系统的干扰压力。叠加干旱少雨的气候条件与脆弱敏感的自然本底，土地利用变化深刻影响着各类生态系统的结构与功能，导致其生态系统服务供给能力下降、价值总量缩减。因此，该区域不仅是黄河流域生态保护和高质量发展战略实施的关键区域，也是协调生态安全与经济发展矛盾、开展人地系统耦合研究的典型样本。

1.2 数据来源

本研究采用的数据涵盖土地利用、地形、气象与土壤等多种类型。土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn），选取1990，1995，2000，2005，2010，2015，2020和2023年共8期数据。根据研究需要，将土地利用类型重新归类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6大类。粮食作物单产与种植面积数据来源于1990—2023年内蒙古自治区及相关五市（乌海市、巴彦淖尔市、鄂尔多斯市、包头市、呼和浩特市）的统计年鉴，2023年个别缺失数据采用2022年对应数值填补，粮食价格数据取自《全国农产品成本收益资料汇编（2024年）》。为模拟2035年土地利用格局，研究选取自然条件、社会经济和交通区位3类驱动因子（表1），基于区域特征与数据可得性，最终确定10项关键指标作为intPLUS模型的驱动因子。为确保数据处理的严谨性与结果的可比性，所有空间数据均统一至Krasovsky_1940_Albers投影坐标系，并保持30 m空间分辨率。

表1 研究数据及其来源

Table 1 Study data and its sources

类型	名称	分辨率/m	数据来源
气候与环境数据	土壤类型	1 000	HWSD世界土壤数据库（http:westdc.westgis.ac.cn）
	年平均气温	30	中国气象数据网（htpp://www.nmic.cn）
	年降水量	30	
	DEM	30	地理空间数据云（http://www.gscloud.cn）
	坡度	30	对DEM进行坡度分析
社会经济数据	人口	1 000	中国科学院资源环境科学与数据中心（http://www.resdc.cn）
	GDP	1 000	
	距公路距离	30	OpenStreetMap（http://www.openstreetmap.org）
	距铁路距离	30	
	距河流距离	30	

2 研究方法

2.1 土地利用转移矩阵

为清晰呈现研究期内土地利用的变化过程与数量，本研究采用土地利用转移矩阵，以揭示1990—2023年黄河流域内蒙古段各类土地利用类型的转化趋势与强度。计算公式为[14]为

$$A_{ij}=\begin{pmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{n1} & \cdots & A_{nn} \end{pmatrix} \tag{1}$$

式中:A为各地类转化面积(km²);i(i=1,2,3…n)和j(j=1,2,3…n)为初期和末期的地类;n为地类数量,n=6。

2.2　生态系统服务价值评估

参考Costanza等使用的当量因子法和谢高地等[7]制定的中国ESV当量表,设定单位面积粮食产生经济价值的1/7为1个标准ESV当量。根据研究区域的实际粮食种植情况,计算出研究区域1个ESV当量因子为1 186.63元/hm²。计算公式[14]为

$$VC=\frac{1}{7}\sum_{i=1}^{n}\frac{m_i p_i q_i}{M}\qquad(i=1\cdots n)\qquad(2)$$

式中:VC为单位面积生态系统服务当量系数的经济价值(元·hm^{-2});m_i为第i种粮食种植面积(hm²);p_i为第i种粮食单产(kg·hm^{-2});q_i为第i种粮食均价(元/kg);M为所有粮食种植总面积(hm²)。本研究将文献[6-7]与资料中直接对应的生态系统服务功能价值研究结果(修正单位功能价值量为统一标准后得到的结果)进行平均计算,得到单位面积生态系统服务价值当量(表2)。根据修正后的单位面积生态服务功能价值系数和各土地利用类型面积计算得出区域ESV。计算公式[13]为

$$ESV=\sum_{i=1}^{6}A_i\cdot VC_i\qquad(3)$$

式中:ESV为区域生态系统服务总价值(元);A_i为地类i的面积(hm²);VC_i为地类i的生态服务功能价值系数(元/hm²)。

2.3　生态系统服务价值贡献率

生态系统服务价值(ESV)贡献率,是指在特定时期内,某一土地利用类型的ESV变化量占研究区ESV总变化量的比重。该指标用以识别影响ESV变化的主要驱动因素,其计算公式[14]为

$$C_i=\frac{|E_i|}{\sum_{i=1}^{n}|E_i|}\times 100\%\qquad(4)$$

式中:C_i表示第i种土地利用类型的ESV贡献率(%);E_i表示在一定时期内第i种土地利用类型的变化量(亿元)。

表2　单位面积生态系统服务价值系数

Table 2　Unit area ecosystem service value coefficient　　单位:元/hm²

生态系统服务		单位面积生态系统服务价值系数					
一级分类	二级分类	耕 地	林 地	草 地	水 域	建设用地	未利用地
供给服务	食物生产	1 001.10	297.38	274.81	771.43	0.00	5.89
	原料生产	471.10	683.10	404.36	429.88	0.00	17.67
	水资源供给	23.56	353.33	223.77	6 407.02	0.00	11.78
调节服务	气体调节	789.10	2 246.58	1 421.16	1 572.31	0.00	76.55
	气候调节	423.99	6 722.07	3 757.06	3 468.51	0.00	58.89
	净化环境	117.78	1 969.80	1 240.57	5 388.26	0.00	241.44
	水文调节	318.00	4 398.94	2 752.03	74 475.70	0.00	141.33
支持服务	土壤保持	1 213.09	2 735.35	1 731.31	1 907.97	0.00	88.33
	维持养分循环	141.33	209.05	133.48	147.22	0.00	5.89
	生物多样性	153.11	2 490.96	1 574.27	6 136.13	0.00	82.44
文化服务	美学景观	70.67	1 092.37	694.88	3 898.39	0.00	35.33
合 计		4 722.82	23 198.94	14 207.72	104 602.82	0.00	765.54

2.4　intPLUS模型

intPLUS模型本质是一种融合多类型随机种子相互作用网络的元胞自动机(CA)模型(即intCARS),其技术框架由三大核心功能模块构成:①土地扩张分析策略(LEAS)[13]。该模块通过两期土地利用遥感监测数据,精准提取各地类的空间扩张区域,通过随机森林算法量化解析不同土地利用类型的转化概率及驱动因子贡献强度;②多类型随机种子相互作用网络CA模型(intCARS)。其中intCARS_calibration校准模块采用双阶段CA模拟架构,先通过第一阶段模拟结果与实际土地利用格局的比对,挖掘二者的空间吻合特征,再基于此识别各地类间的相互作用关系网络,将驱动因子贡献值转化为对应效应参数并应用于第二阶段模拟,最终采用kappa系数、总体分类精度及图斑重叠度(FOM)指标,完成两阶段模拟结果的精度验证;③未来土地利用格局模拟预测模块。intCARS_prediction模块通过输入预设斑块数量、土地利用转移矩阵及邻域作用权重等关键参数,实现对未来特定时期土地利用类型空间分布数据的模拟输出[15]。结合研究区实际特

征与数据可得性，本研究选取土壤类型、年平均气温、年降水量、DEM、坡度、人口、GDP、到公路距离、到铁路距离及到河流距离共10项指标，作为驱动土地利用变化的核心因子。本文通过调整土地利用转移概率阈值，构建自然发展、耕地保护、生态保护及城镇发展4类情景，实现对未来不同发展路径下土地利用格局的预测。为预测不同发展路径下的土地利用格局，本研究将土地利用转移矩阵作为核心工具，用以界定各类用地在不同情景下的转化可行性。该矩阵采用二元赋值规则，并参考相关文献，同时结合研究区的发展目标与生态约束条件，最终确定了适用于多情景模拟的土地利用转移成本矩阵[16-18]（表3）。基于2010年与2015年两期土地利用数据，本研究运用intPLUS模型对黄河流域内蒙古段2020年的土地利用格局进行模拟。通过将模拟结果与2020年实际土地利用数据进行精度验证，得出首次模拟的kappa系数为0.839 6，总体精度为0.901 5；二次模拟的kappa系数为0.841 1，总体精度为0.902 1。二次模拟精度略高于首次，表明模型具有较高的可靠性，能够满足黄河流域内蒙古段土地利用变化模拟与预测的研究需求。在此基础上，进一步以5 a为周期，对2035年4种不同情景下的土地利用空间格局进行模拟预测。

3 结果与分析

3.1 1990—2023年土地利用时空演变特征分析

基于1990—2023年期间8期土地利用数据，本研究统计了各时点国土空间面积，计算各地类面积比例变化（表4），并绘制了土地利用空间分布图（图1）。分析结果表明1990—2023年草地与未利用地是黄河流域内蒙古段的主要土地利用类型。1990年二者面积合计占研究区总面积的81.34%；至2023年该比例小幅下降至80.38%，在33年间始终维持在八成以上，构成区域生态用地的基本格局。建设用地与水域面积比例最小，1990年建设用地与水域面积分别为4 106.67和4 549.52 km²；2023年建设用地面积增至6 336.40 km²，水域面积降至4 135.04 km²，两者合计比例仍不足6%，反映黄河流域内蒙古段水域资源稀缺性与建设用地扩张的有限性。在变化趋势上，建设用地与林地面积持续增加，主要集中于呼和浩特市与包头市，体现区域城镇化进程推进与生态修复工程成效，草地与水域为波动型变化，草原生态保护加强，修复推进重点生态功能区退耕还林还草、退牧还草等政策的实施，推进荒漠化植被类型和草原类型自然保护地建设，严格落实禁牧休牧、草畜平衡等制度，防止草原进一步退化沙化，草地面积波动，在政策的保护下33 a间面积减少894.59 km²，水域变化受自然气候波动与人为调控共同影响；而未利用地、耕地及水域面积则呈下降态势。33 a间耕地净减少505.88 km²，降幅2.24%，主要区域为巴彦淖尔市东部；未利用地净减少986.57 km²，降幅2.07%，主要为鄂尔多斯市，反映耕地保护与未利用地开发的双重导向。

表3 黄河流域内蒙古段4种情景下土地利用转换成本矩阵

Table 3 Land use conversion cost matrix under four scenarios in Inner Mongolia section of Yellow River basin

情景	土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
自然发展	耕地	1	1	1	1	1	1
	林地	1	1	1	1	1	1
	草地	1	1	1	1	1	1
	水域	1	1	1	1	1	1
	建设用地	0	0	0	0	1	0
	未利用地	1	1	1	1	1	1
耕地保护	耕地	1	1	1	0	1	1
	林地	1	1	1	0	1	1
	草地	1	1	1	1	1	1
	水域	1	0	1	1	1	1
	建设用地	0	0	0	0	1	0
	未利用地	1	1	1	1	1	1
生态保护	耕地	1	1	1	1	1	1
	林地	0	1	0	0	0	0
	草地	0	1	1	1	0	0
	水域	0	0	0	1	0	0
	建设用地	0	0	0	0	1	0
	未利用地	1	1	1	1	1	1
城镇发展	耕地	1	0	0	0	1	0
	林地	1	1	1	0	1	1
	草地	1	1	1	1	1	1
	水域	1	1	1	1	0	1
	建设用地	0	0	0	0	1	0
	未利用地	1	1	1	0	1	1

注：1表示土地利用类型间可发生转换，0表示类型间不可转换。

本研究基于1990—2023年土地利用转移矩阵绘制了桑基图（图2），直观展示了黄河流域内蒙古段土地利用类型间的转移路径与数量关系。在此期间，该区域土地利用转型活跃，转变总面积为47 272.91 km²，各类用地的转移强度呈现显著分异特征：水域、林地、建设用地为高转型强度地类（转出强度＞50%），反映其受自然与人为因素影响下的高动态性；耕地与未利用地属于中转型强度地类（30%＜转出强度＜

50%),体现农业用地调整与后备资源开发的适度变化;草地则表现为低转型强度地类(转出强度<20%),虽其转换面积占总转移面积的38.31%,但转入量略高于转出量,净增892.03 km²,呈现出“动态平衡、略有增益”的态势,凸显其作为区域生态基底的相对稳定性和韧性。从主要转移路径看,草地转入主要来源于未利用地和耕地,转出则主要流向未利用地、耕地及建设用地;建设用地扩张主要占用耕地和草地,转入总量达2 592.95 km²,契合区域城镇化、工业化与能源产业发展的现实背景。

表 4　黄河流域内蒙古段 1990—2023 年土地利用面积及变化

Table 4　Land use area and changes in Inner Mongolia section of Yellow River basin from 1990 to 2023

年 份	指 标	耕 地	林 地	草 地	水 域	建设用地	未利用地
1990	面积/km²	22 605.27	5 947.52	113 575.25	4 549.52	4 106.67	47 566.38
	比例/%	11.40	3.00	57.26	2.29	2.07	23.98
1995	面积/km²	23 280.04	5 612.77	116 043.78	3 506.25	4 290.44	45 617.33
	比例/%	11.74	2.83	58.50	1.77	2.16	23.00
2000	面积/km²	22 687.12	5 945.40	112 973.38	4 532.16	4 180.84	48 031.72
	比例/%	11.44	3.00	56.96	2.28	2.11	24.22
2005	面积/km²	22 633.74	6 614.81	110 945.51	4 425.05	4 464.03	49 267.49
	比例/%	11.41	3.33	55.93	2.23	2.25	24.84
2010	面积/km²	25 156.51	6 019.53	108 578.89	4 305.19	4 639.17	49 651.33
	比例/%	12.68	3.03	54.74	2.17	2.34	25.03
2015	面积/km²	24 989.92	6 028.98	108 729.77	4 299.28	4 918.64	49 384.03
	比例/%	12.60	3.04	54.81	2.17	2.48	24.90
2020	面积/km²	22 234.80	6 839.06	111 227.60	4 573.38	6 140.50	47 335.28
	比例/%	11.21	3.45	56.08	2.31	3.10	23.86
2023	面积/km²	22 099.39	6 519.31	112 680.66	4 135.04	6 336.40	46 579.81
	比例/%	11.14	3.29	56.81	2.08	3.19	23.48

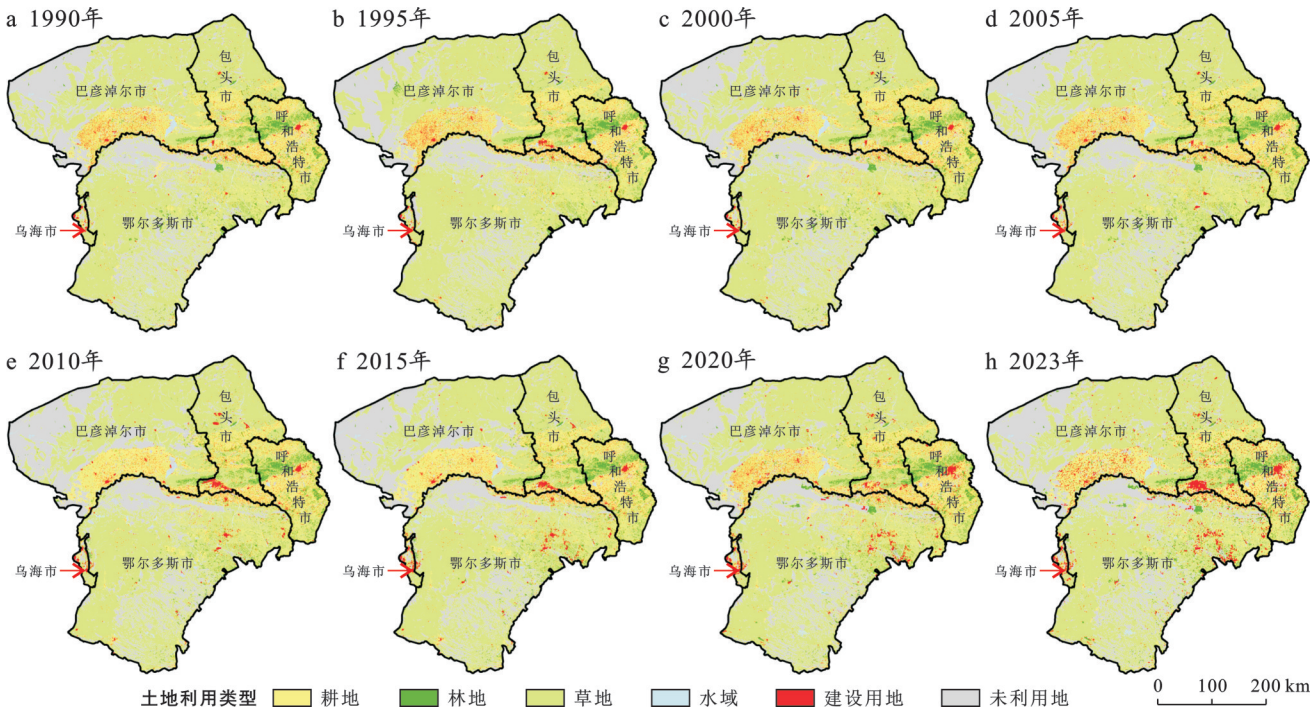


图 1　黄河流域内蒙古段 1990—2023 年土地利用空间分布

Fig.1　Spatial distribution of land use in Inner Mongolia section of Yellow River basin from 1990 to 2023

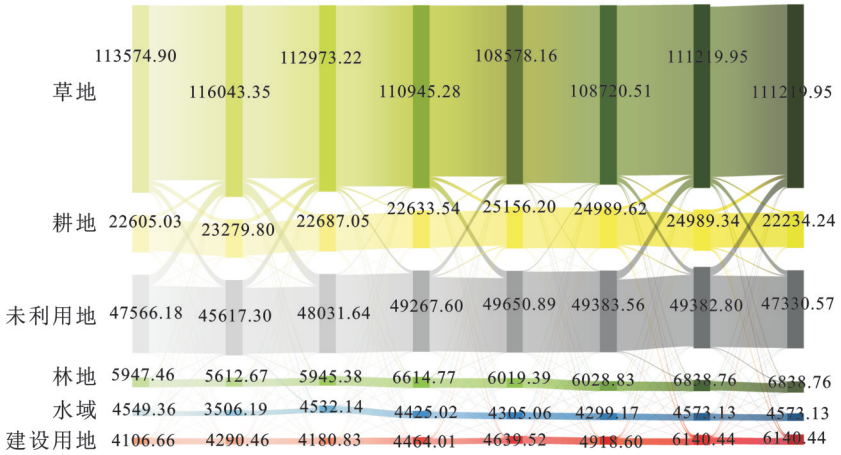


图 2 黄河流域内蒙古段 1990—2023 年土地利用转移矩阵桑基图

Fig.2 Sankey diagram of land use type transfer matrix in Inner Mongolia section of Yellow River basin from 1990 to 2023

空间上，土地利用转换表现出显著的区位分异特征（图 3）。后套平原作为核心农业区，耕地与水域间双向转换突出，体现灌溉农业系统的稳定性，同时存在少量耕地转为建设用地，反映城镇扩张对耕地的局部挤占。前套平原则以耕地和草地转为建设用地为主要扩张方向，印证该区域作为人口经济集聚带的发展特征，而少量建设用地逆向转换为生态用地，也体现局部生态修复的成效。在生态脆弱区，荒漠草原以未利用地转为草地为主；库布其沙漠表现为未利用地与草地的双向转换，反映生态系统的波动性；毛乌素沙地未利用地转为林草地的比例最高，彰显“沙退绿进”的治理成效。黄土丘陵区则呈现耕地与林草地的双向转换，体现农业开发与生态治理的持续博弈，少量耕地转为水域也对应该区域小型水利设施的建设。

3.2 1990—2023 年 ESV 时空演变特征分析

3.2.1 ESV 时序演变特征

黄河流域内蒙古段 ESV 在 1990—2023 年波动大，但总体稳定，小幅下降。在此期间，ESV 总值从 1990 年的 2 388.24 亿元下降至 2023 年的 2 367.87 亿元（表 5），净减少 20.37 亿元，变化率为 −0.85%，年均减少约 0.62 亿元。尽管下降速率较为平缓，说明区域生态系统服务功能在总体上保持基本稳定，但长期仍存在轻微的退化趋势。1990—1995 年研究区内林地与水域，其面积减少直接导致核心服务供给萎缩，尽管草地面积净增 2 468.53 km^2，但新增草地多来自未利用地修复与耕地转换，其生态系统成熟度、服务供给效率低于原生林地与水域，使 ESV 总价值下降，5 a 间净减少 80.68 亿元，降幅达 3.38%，为 33 a 间下降幅度最大、速率最快的时期。调节服务是黄河流域内蒙古段生态系统服务核心功能，其次为支持服务，二者占总 ESV 超 88%；支持服务、调节服务、支持服务、文化服务、供给服务均呈负向演变。其中调节服务 ESV 比例稳定在 65.92%～66.75%，总变化量 −12.11 亿元、变化率 −0.76%，缩减幅度最小，是区域生态安全核心支撑；供给服务 ESV 缩减最显著，变化率 −1.18%；支持服务 ESV 变化率 −1.02%，仅 2000—2015 年显著减少，下降幅度为 −2.47%，其余时段波动小于 1%，稳定性强；文化服务 ESV 变化率 −0.87%，波动最小。单项生态系统服务二级分类中，11 项呈“10 减 1 持平”格局，无增加项。食物生产 ESV 显著减少，下降幅度为 −1.80%，水资源供给 ESV 变化幅度最小，减少 0.58%；唯一波动持平的是原料生产 ESV，1990—2023 年总变化量 −0.74 亿元、变化率 −1.16%，2000—2023 年波动仅 −0.88%，2010—2020 年回升 0.52%。

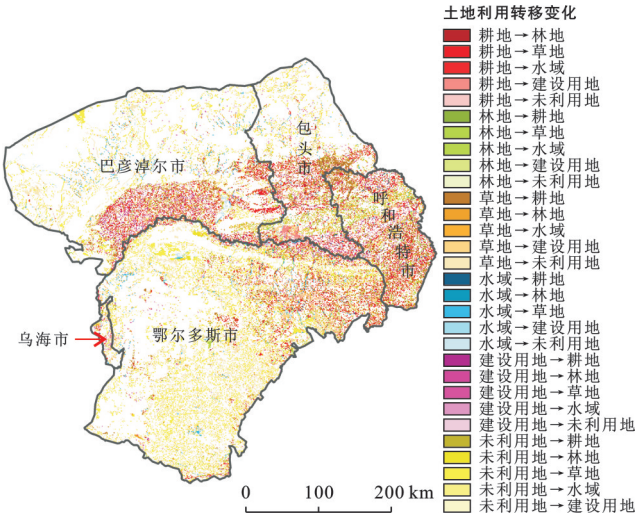


图 3 黄河流域内蒙古段 1990—2023 年土地利用转移矩空间分布

Fig.3 Spatial distribution of land use transfer matrix in Inner Mongolia section of Yellow River basin from 1990 to 2023

基于 ESV 计算公式与长时序土地利用数据分析（表 6），土地利用变化与 ESV 响应关系显著。草地

作为面积最大的地类,始终是ESV的绝对核心,其价值比例长期维持在67%～72%。1990—2023年草地面积净增894.59 km²,其ESV由1 625.80亿元小幅波动降至1 612.81亿元,呈现“面积增长,价值稳定”的特征,尤其在2015年后随面积回升ESV同步增长,凸显其核心生态支撑作用与恢复潜力。水域面积由4 549.52 km²缩减至4 135.04 km²,是ESV降幅最大的地类,其价值比例由20.07%降至18.61%。水域生态功能脆弱且对外部变化高度敏感,其剧烈波动是导致ESV总体波动的主要驱动因素。林地为唯一面积与ESV双增长的地类,其ESV由139.02亿元增至152.38亿元,比例由5.82%提升至6.51%,虽比例较低但增长趋势明确,反映生态修复工程对森林生态功能的稳步提升作用。耕地面积略有下降,ESV温和减少至105.14亿元,比例稳定在4.49%～4.50%,体现农业生产活动对耕地生态功能的轻微影响。未利用地面积小幅缩减,其ESV长期处于低位,比例在1.47%～1.55%波动,生态价值贡献微弱。建设用地ESV始终为0,符合其生态服务功能微弱的基本属性(本研究未考虑其间接生态影响)。

表5　黄河流域内蒙古段1990—2023年ESV及其变化

Table 5　ESV and its changes in Inner Mongolia section of Yellow River basin from 1990 to 2023

一级分类	二级分类	ESV/亿元								变化量/亿元	变化率/%
		1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	2023年	1990—2023年	1990—2023年
供给服务	食物生产	59.84	60.28	59.75	59.26	60.88	60.74	59.10	58.78	−1.07	−1.80
	原料生产	63.91	64.52	63.70	63.29	63.06	63.04	63.39	63.17	−0.74	−1.20
	水资源供给	58.18	51.88	57.94	57.04	55.59	55.58	58.11	57.84	−0.34	−0.60
调节服务	气体调节	204.92	206.43	204.13	202.62	199.73	199.80	203.30	202.69	−2.23	−1.10
	气候调节	498.54	502.15	496.25	492.79	480.49	480.98	495.60	494.45	−4.10	−0.80
	净化环境	192.70	189.06	191.97	190.48	186.08	186.16	191.56	191.01	−1.69	−0.90
	水文调节	696.52	623.57	693.63	683.13	665.81	665.70	695.61	692.42	−4.10	−0.60
支持服务	土壤保持	255.09	257.12	254.15	252.29	249.41	249.45	253.03	252.23	−2.86	−1.10
	维持养分循环	20.70	20.89	20.63	20.48	20.38	20.38	20.52	20.45	−0.25	−1.20
	生物多样性	230.61	227.18	229.60	227.49	221.93	222.09	229.19	228.54	−2.07	−0.90
文化服务	美学景观	107.22	104.46	106.75	105.69	103.10	103.17	106.62	106.29	−0.93	−0.90
合 计		2 388.24	2 307.56	2 378.49	2 354.56	2 306.46	2 307.10	2 376.03	2 367.87	−20.37	−0.90

表6　黄河流域内蒙古段1990—2023年土地利用类型ESV及其变化

Table 6　ESV of land use types and their changes in Inner Mongolia section of Yellow River basin from 1990 to 2023

年份	项 目	耕 地	林 地	草 地	水 域	建设用地	未利用地
1990	ESV/亿元	107.57	139.02	1 625.80	479.47	0.00	36.69
	比例/%	0.05	0.06	0.68	0.20	0.00	0.02
1995	ESV/亿元	110.78	131.19	1 661.14	369.53	0.00	35.19
	比例/%	0.05	0.06	0.72	0.16	0.00	0.02
2000	ESV/亿元	107.95	138.97	1 617.19	477.65	0.00	37.05
	比例/%	0.05	0.06	0.68	0.20	0.00	0.02
2005	ESV/亿元	107.70	154.61	1 588.16	466.36	0.00	38.00
	比例/%	0.05	0.07	0.67	0.20	0.00	0.02
2010	ESV/亿元	119.70	140.70	1 554.28	453.73	0.00	38.30
	比例/%	0.05	0.06	0.67	0.20	0.00	0.02
2015	ESV/亿元	118.91	140.92	1 556.32	453.11	0.00	38.09
	比例/%	0.05	0.06	0.67	0.20	0.00	0.02
2020	ESV/亿元	105.80	159.85	1 592.17	481.99	0.00	36.51
	比例/%	0.04	0.07	0.67	0.20	0.00	0.02
2023	ESV/亿元	105.14	152.38	1 612.81	435.80	0.00	35.92
	比例/%	0.04	0.07	0.69	0.19	0.00	0.02
1990—2023	变化量/亿元	−2.42	13.36	−12.99	−43.67	0.00	−0.77
	变化率/%	−0.02	0.10	−0.01	−0.09	0.00	−0.02

3.2.2 ESV空间演变特征

1990—2023年黄河流域内蒙古段ESV在空间上呈现出显著的区域分异。

由图4可以看出，高值区主要分布于鄂尔多斯市与巴彦淖尔市、包头市、呼和浩特市的交界地带，其中呼包鄂地区整体表现出较高的ESV水平。相比之下，乌海市及巴彦淖尔市西部则形成明显的低值区。这种空间格局与研究区的土地利用结构密切相关，东北部林地、草地分布较为集中，而西南部同类生态用地相对较少。具体而言，乌海市与巴彦淖尔市的ESV低值区主要对应未利用地与耕地，前者因开发程度低、后者因覆盖广泛且生态系数偏低，共同导致其ESV贡献较低。在经济发展水平较高的呼包鄂地区，建设用地分布广泛，土地利用密集，植被覆盖较少，进一步影响了ESV的空间分布。中低值和中值区域主要位于包头市与鄂尔多斯市西南部，以草地为主要土地利用类型，其间ESV在1990—2023年呈现出从中高值向中值的明显转变。河套平原农业区ESV低于鄂尔多斯西部及后山荒漠草原，河套平原农业区以耕地为主，单位面积ESV系数低于鄂尔多斯西部及后山荒漠草原的草地，价值集中于供给服务，调节与支持服务贡献不足，农业生产导向型区域生态服务供给能力弱于生态调节导向型草原，形成此格局。较高数值的地区主要集中在鄂尔多斯市北部，而中高值区域则多分布于黄河沿岸，以耕地和草地为主要地类。

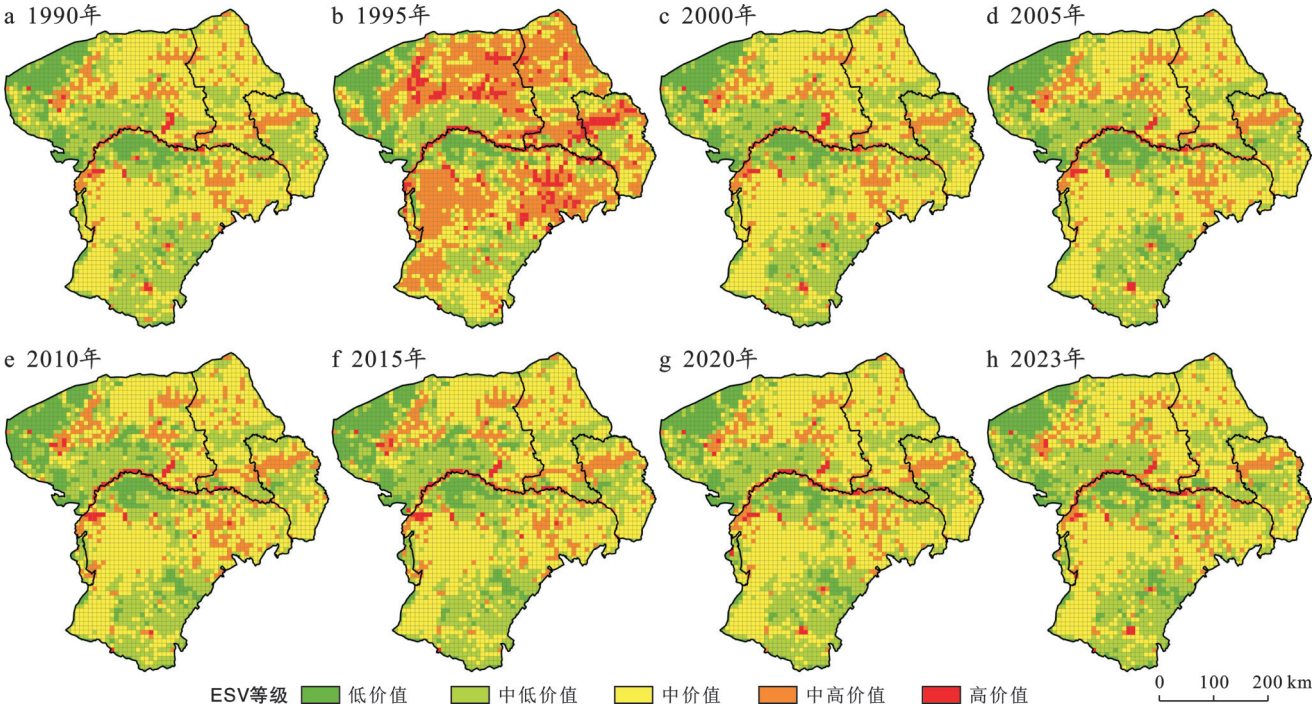


图4 黄河流域内蒙古段1990—2023年ESV的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of ESV in Inner Mongolia section of Yellow River basin from 1990 to 2023

在时序演变方面，1990—2023年ESV的空间变化呈现出明显的区域差异性（图5）。前套平原的ESV变化量介于－1.2～0.4，整体呈小幅波动下降趋势。作为人口与农业活动的复合区，该区域局部存在耕地转为建设用地以及水域面积缩减的现象，耕地生态功能的轻微弱化与水域服务供给的减少共同推动了ESV的温和下降。后套平原的ESV变化量同样集中在－1.2～0.4，整体呈弱波动态势。作为灌溉农业核心区，该区域耕地稳定性达59.0%，在水域面积仅小幅波动的背景下，ESV得以维持基本稳定。

在生态修复重点区域，ESV表现出积极的变化趋势。库布其沙漠北缘（图6中浅绿色斑块集中区）ESV呈小幅上升，该区域在1990—2023年从未利用地向草地的转移面积较大，荒漠草原植被的恢复有效提升了防风固沙与土壤保持功能，从而支撑了ESV的正向增长。毛乌素沙地（图5中深绿色斑块分布区）则是ESV上升最为显著的区域，其未利用地向林地、草地转移的比例高达21.4%，“沙退绿进”成效显著，林草地面积的扩张直接增强了碳固定、生物多样性维持等服务功能，使其成为ESV的高增长区。相比之下，荒漠草原带的ESV变化量以－1.2～0.4为主，整体呈现弱波动状态。该区域草地与未利用地之间存在显著的双向转移，土地沙化过程与生态治理措施并存，导致其ESV在小幅下降与上升之间反复波动。

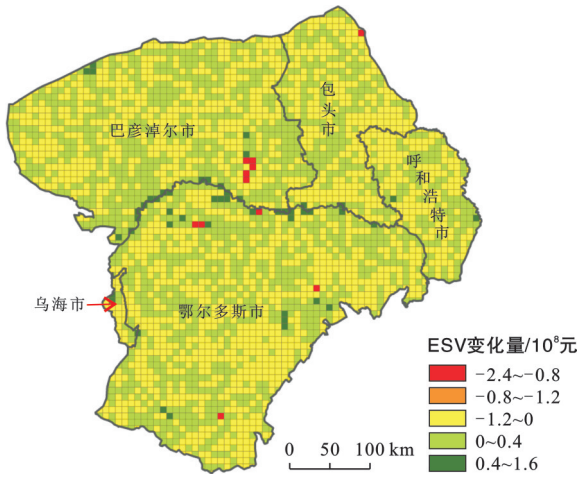
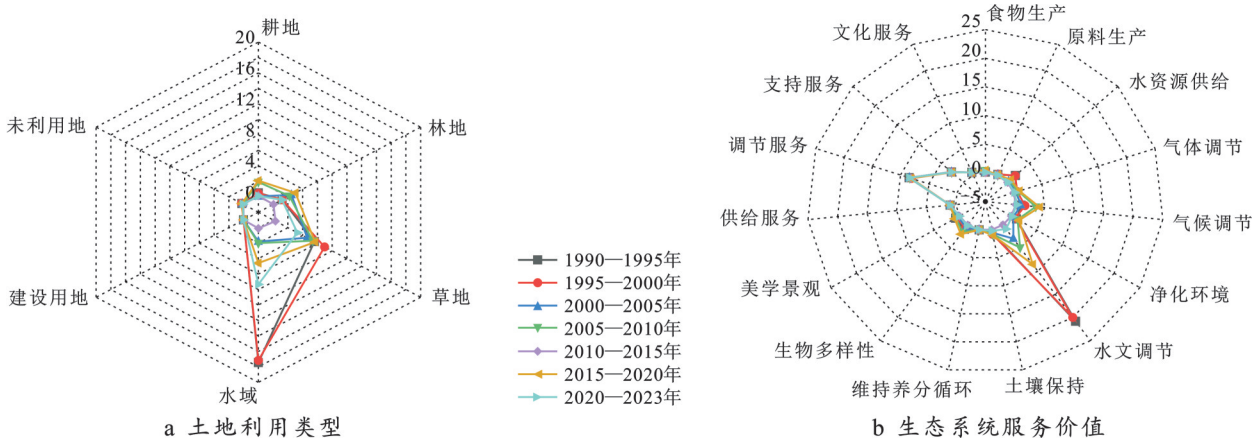


图 5　黄河流域内蒙古段 1990—2023 年 ESV 变化量空间分布

Fig.5　Spatial distribution of ESV change in Inner Mongolia section of Yellow River basin from 1990 to 2023

3.3　1990—2023 年 ESV 的贡献率分析

1990—2023 年黄河流域内蒙古段不同土地利用类型对 ESV 变化的贡献率存在显著的时空差异(图 6)。整体上,草地与水域是主导 ESV 变化的核心地类,但在不同时段,其核心驱动地类有所不同,这与土地利用变化的格局及 ESV 的演变趋势高度吻合。草地与水域始终是影响 ESV 变化的关键地类。草地在各时段的贡献率介于 3.28%~6.98%,并于 1995—2000 年达到峰值 6.98%,是除水域外贡献率最高的地类,其贡献率变化与草地面积波动直接相关,2000 年前草地面积相对稳定,贡献率维持高位,2005—2015 年草地减少幅度加大,贡献率降至 0.32%~5.38%,2015 年后生态修复推动草地局部恢复,贡献率回升至 5.69%;水域贡献率波动幅度最大为 1.79%~17.45%,1990—2000 年贡献率超过 17.00%,是该阶段 ESV 变化的首要驱动地类,这与 1990—1995 年水域萎缩其 ESV 骤降,1995—2000 年水域修复其 ESV 回升的剧烈波动一致。2000—2010 年水域面积趋稳,贡献率降至 1.79%~2.00%,2015 年后水域生态补水工程推进,贡献率回升至 4.58%~7.33%。林地贡献率呈“波动上升”趋势,2015—2020 年达峰值 3.01%,贡献率维持在 0.04%~2.48%,2015 年后退耕还林等工程强化,林地生态功能提升,对 ESV 变化的正向贡献显著增强;耕地贡献率整体较低,2005—2010 年、2015—2020 年分别达 1.91%,2.08%,对应耕地面积局部调整阶段,2015 年后耕地保护政策见效,其贡献率变化反映耕地对 ESV 的影响具有阶段性;未利用地对 ESV 的影响始终较小,贡献率保持在 0.30% 以下。黄河流域内蒙古段生态系统服务价值的高低,与水域、草地、林地这 3 类用地密切相关,是该区域生态系统的关键组成部分;因此在推进生态环境保护、促进生态产品价值落地的实践中,应着重关注这些用地的动态演变趋势并做好保护工作。



a 土地利用类型　　b 生态系统服务价值

图 6　黄河流域内蒙古段 1990—2023 年不同土地利用类型与单项生态系统服务价值的 ESV 贡献率

Fig.6　ESV contribution rate of different land use types and individual ecosystem service value in Inner Mongolia section of Yellow River basin from 1990 to 2023

3.4　基于多情景模拟的 2035 年土地利用与 ESV 时空演变分析

3.4.1　2035 年土地利用变化分析

本研究基于 intPLUS 模型,模拟获取了 2035 年在自然发展、耕地保护、生态保护及城镇发展 4 种情景下的土地利用格局数据。通过与基准年(2020 年)对比,揭示了不同发展路径下各类用地面积的动态演变特征(表 7)。与 2020 年相比,4 种情景下的土地利用变化呈现显著差异:自然发展情景中,耕地微增 157.75 km^2,林地减少 574.59 km^2,草地、水域、建设用地及未利用地面积基本维持稳定,反映研究区土地利用遵循历史趋势的演变规律;耕地保护情景下,耕地面积显著增加 3 860.92 km^2,比例提升至 10.44%,成为该情景下唯一大幅增长的地类,而林地、水域分别减少

2 324.58和931.08 km²，未利用地减少958.96 km²，体现耕地保护政策对其他用地类型的挤压效应；生态保护情景下，草地面积增幅最为突出，较2020年增加12 704.84 km²，未利用地减少6 372.32 km²，林地面积基本持平，建设用地仅微增128.11 km²，凸显生态保护政策对林草生态系统的修复与保护成效；城镇发展情景下，建设用地扩张态势最为明显，面积增加759.35 km²，比例升至4.43%，而林地、水域分别减少，耕地虽增加3 110.62 km²，但增幅低于耕地保护情景，反映城镇化进程对生态用地与农业用地的双重挤占作用（图7）。生态保护情景通过严格约束建设用地扩张，有效维系了林草生态系统的完整性，草地面积比例显著高于其他情景；城镇发展情景则因建设用地的高强度扩张，导致林地、水域等生态用地面积降至最低，生态空间压缩明显；耕地保护情景实现了耕地总量的大幅提升，但以牺牲生态用地为代价；自然发展情景则呈现“无明显政策干预”下的均衡演变特征。

表7 黄河流域内蒙古段2035年4种情景模拟下土地利用面积

Table 7 Land use area under four scenarios in Inner Mongolia section of Yellow River basin in 2035

项目		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2020年（基准年）	面积/km²	16 789.24	8 666.22	117 048.75	4 953.74	8 009.36	42 388.19
	比例/%	8.49	4.38	59.16	2.50	4.05	21.42
自然发展情景	面积/km²	16 946.99	8 091.63	117 044.40	4 953.28	8 462.15	42 357.04
	比例/%	8.57	4.09	59.16	2.50	4.28	21.41
耕地保护情景	面积/km²	20 650.16	6 341.64	116 939.43	4 022.66	8 472.37	41 429.23
	比例/%	10.44	3.21	59.10	2.03	4.28	20.94
生态保护情景	面积/km²	10 347.95	8 679.76	129 753.59	4 920.86	8 137.47	36 015.87
	比例/%	5.23	4.39	65.58	2.49	4.11	18.20
城镇发展情景	面积/km²	19 899.86	6 063.72	116 951.56	3 823.03	8 768.71	42 348.61
	比例/%	10.06	3.06	59.11	1.93	4.43	21.40

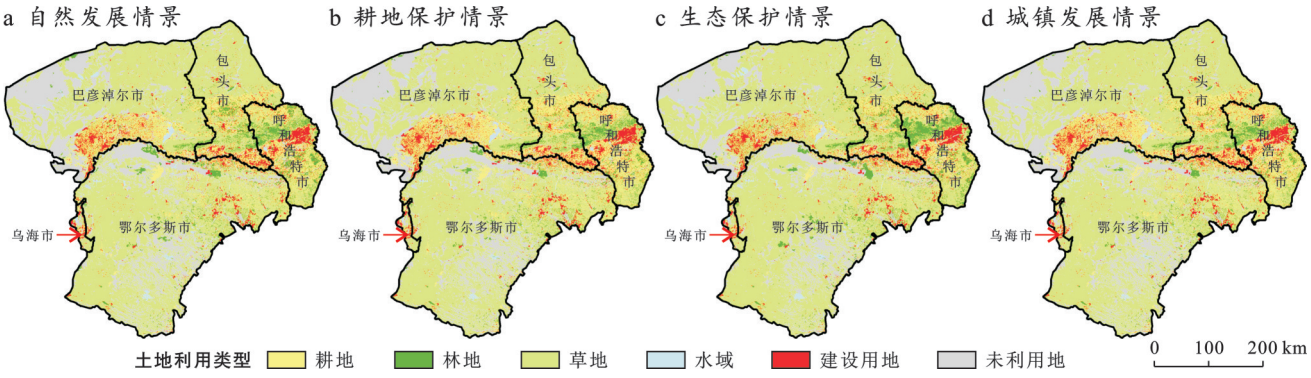


图7 黄河流域内蒙古段2035年4种情景模拟下的土地利用空间分布

Fig.7 Spatial distribution of land use under four scenarios in Inner Mongolia section of Yellow River basin in 2035

3.4.2 2035年多情景下ESV变化分析

在模拟的4种情景下，ESV呈现出“一增三减”的差异化格局（表8）。生态保护情景是唯一实现ESV正向增长的情景，总价值达到2 655.91亿元，凸显出生态优先发展模式对区域生态系统服务功能的提升作用（图8）。自然发展情景下的ESV呈小幅退化趋势。在无强制政策干预下，土地利用沿历史轨迹演变对ESV产生微弱的负面影响。耕地保护情景与城镇发展情景ESV均呈显著下降态势，分别减少136.38亿元和166.61亿元，其中城镇发展情景ESV损失最为突出，表明高强度城镇化进程对生态系统服务价值的冲击最为强烈。自然发展情景中，ESV小幅下降主要源于林地ESV减少13.43亿元，而耕地ESV微增0.75亿元，草地与水域ESV基本持平，体现该情景下土地利用结构小幅调整对ESV的均衡影响；耕地保护情景下，耕地ESV虽增加18.37亿元，但林地、水域ESV分别大幅减少54.33亿元和98.13亿元，叠加草地与未利用地ESV的小幅下降，导致总ESV显著退化，体现耕地保护政策实施过程中对生态用地的挤压效应；城镇发展情景下，ESV损失主要源于两大核心生态用地，林地

ESV减少60.83亿元、水域ESV减少119.17亿元,虽然耕地ESV增加14.80亿元,但不足以抵消生态用地退化带来的价值损失,本质是城镇化扩张对生态空间的高强度挤占所致;生态保护情景下,ESV增长的核心驱动力为草地ESV显著增加181.88亿元,尽管耕地、水域及未利用地ESV有所减少,但草地作为区域ESV的主导贡献类型,其价值提升主导总ESV的增长,印证林草生态修复工程的实践成效。不同情景下ESV的演变差异本质上反映“生态保护-耕地保障-城镇发展”三大发展目标的权衡关系。

表8　黄河流域内蒙古段2035年4种情景下ESV

Table 8　ESV under four scenarios in Inner Mongolia section of Yellow River basin in 2035　　单位:亿元

土地利用类型		耕 地	林 地	草 地	水 域	建设用地	未利用地	合 计
2020年ESV		79.89	202.56	1 675.52	522.08	0.00	32.69	2 512.74
自然发展情景	ESV	80.64	189.13	1 675.46	522.03	0.00	32.67	2 499.93
	变化量	0.75	−13.43	−0.06	−0.05	0.00	−0.02	−12.81
耕地保护情景	ESV	98.26	148.23	1 673.97	423.95	0.00	31.95	2 376.37
	变化量	18.37	−54.33	−1.55	−98.13	0.00	−0.74	−136.38
生态保护情景	ESV	49.24	202.88	1 857.39	518.61	0.00	27.78	2 655.91
	变化量	−30.65	0.32	181.88	−3.47	0.00	−4.92	143.16
城镇发展情景	ESV	94.69	141.73	1 674.14	402.91	0.00	32.66	2 346.14
	变化量	14.80	−60.83	−1.38	−119.17	0.00	−0.03	−166.61

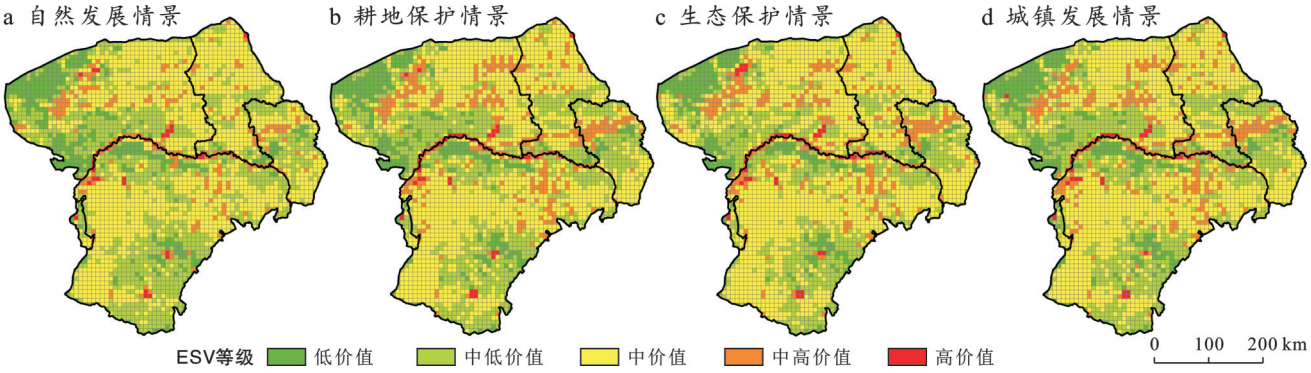


图8　黄河流域内蒙古段2035年4种情景下ESV空间分布

Fig.8　Spatial distribution of ESV under four scenarios in Inner Mongolia section of Yellow River Basin in 2035

4　讨　论

自然条件变迁与人类活动的耦合作用,驱动黄河流域内蒙古段土地利用结构持续重构,进而引发ESV的时空分异与阶段性波动。从动态演变特征来看,区域ESV变化呈现显著区位适配性,前套平原因耕地向建设用地转化、水域面积缩减,ESV呈小幅波动下降;后套平原依托耕地高稳定性,在水域面积小幅波动下维持ESV基本稳定;库布其沙漠北缘与毛乌素沙地通过生态修复工程推动ESV不同程度上升;荒漠草原带则因沙化与治沙过程并存,呈现ESV弱波动态势。值得深入探讨的是,尽管2023年研究区生态系统与景观结构较1990年显著优化:林地面积净增,草地生态屏障功能稳固,荒漠草原沙化趋势得到有效遏制,黄河流域的泥沙调控、水资源保护等核心需求,印证了区域生态改善与黄河安澜的正向耦合关系。形成“林地增量提质,草地稳中有升”的格局,但是ESV仍呈小幅下降。“结构优化与价值微降”的矛盾核心在于生态用地的结构性损耗:水域作为单位面积ESV系数最高的地类,其持续缩减直接导致水文调节、生物多样性维持等关键服务供给萎缩;而建设用地的持续扩张,其占用的优质耕地、草地等生态用地的服务价值,远非新增林草地的生态增益所能弥补,最终形成生态结构改善与服务价值下降的错位特征。

土地利用类型变化是驱动ESV时空演变的核心因素,耕地、林地、草地、水域的相互转化直接调控ESV损益,其中草地、水域等生态用地面积缩减是ESV小幅下降的关键驱动,这一结论与长江流域[19]、塔里木河流域[20]的研究结果一致。黄河流域内蒙古

段2000—2020年出现的草地、耕地向建设用地转移现象，直接干扰了生态系统稳定性，印证了城镇开发类人类活动对生态系统的负面干扰具有普遍性，与郭兰博等[13]，牛统莉等[21]的研究结论高度契合。生态保护政策的系统性实施，成为维系ESV稳定的核心支撑，“三线一单”与自然保护地体系强化了生态红线刚性约束，大青山封山育林、天然林保护工程推动林地ESV持续增长；退耕还林还草、退牧还草等工程与草畜平衡制度协同发力，保障了草地作为ESV绝对核心的地位；十大孔兑小流域综合治理、河套—土默川平原盐碱地治理等工程，分别维护了土壤保持功能与耕地生态稳定性，避免了ESV大幅下滑。多情景模拟进一步证实，通过草地、林地修复可实现ESV增长，这与长江流域[19]、大冶湖流域[22]研究结果一致，凸显“生态用地保护与合理利用”对ESV稳定的核心意义，为流域生态保护政策制定提供了一致的科学逻辑。

本研究紧密结合《内蒙古自治区黄河流域国土空间规划（2021—2035年）》等战略要求，可为区域差异化空间管控提供科学依据[23-25]。针对不同功能区提出以下优化路径。①在城镇发展区（如呼包鄂核心区），应建立刚性约束机制，严格控制建设用地无序扩张，推行集约高效发展模式，并强化对耕地、城市生态空间及廊道的保护，探索城镇增长边界内的生态价值提升路径。②在生态脆弱区与重点修复区（如沙漠边缘、黄土丘陵、干支流沿岸），需持续深化系统性生态工程，如禁牧休牧、退耕还林还草、水土流失综合治理等，核心在于扩大高质量林草生态用地规模，提升其生态系统调节服务功能，巩固生态治理成果。③在农业生产区（如后套平原），应坚持耕地数量、质量与生态“三位一体”保护，在保障粮食安全的同时，通过盐碱地治理、节水灌溉、生态农田建设等措施，维护和提升耕地生态系统的服务功能，实现农业可持续发展与生态保护协同增效。

本研究仍存在方法论局限，采用的当量因子法未充分考虑区域内部水文条件、土壤质地的空间异质性，统一使用区域平均当量因子可能导致局部ESV高估或低估；将建设用地ESV系数设为0，忽略了城镇绿地、湿地的碳汇功能、城市空间的休闲游憩服务及海绵城市建设带来的水文调节价值，导致评估结果未能完整反映“生产-生活-生态”空间的复合功能；未构建土地利用与ESV耦合模拟模型，仅基于历史数据总结规律，无法精准预测未来演变趋势[25-27]。需引入空间异质性修正系数，结合GIS技术与实地采样数据构建栅格尺度差异化当量因子表；修正建设用地ESV当量因子，量化城镇生态斑块的多元价值；纳入碳排放、水资源稀缺性等关键因子，完善ESV评估指标体系。同时，需解析生态系统服务的协同与权衡关系，制定多目标优化的土地利用布局方案，并构建ESV动态监测预警系统，实现变化实时跟踪与风险预警，为区域可持续发展提供更精准的决策支撑。

5 结 论

（1）1990—2023年黄河流域内蒙古段土地利用转型呈现“人工用地扩张，生态用地动态适配”的核心特征，前套平原以建设用地扩张与耕地缩减为主，凸显城镇化对农业空间的刚性挤占；毛乌素沙地、库布其沙漠北缘及荒漠草原带，以林地小幅增长，草地与未利用地双向转化为核心，反映生态修复与自然环境的交互效应。“耕地-建设用地”“草地-未利用地”的双向转化构成主导类型，为区域国土空间优化与生态-发展协同提供了核心依据。

（2）1990—2023年黄河流域内蒙古段ESV呈小幅波动下降态势，远低于全国同类生态脆弱区，凸显生态工程的缓冲作用。ESV功能结构稳定性强，以调节服务为核心且比例恒定，空间上呈现“呼包鄂东北部、黄河沿岸及鄂尔多斯北部偏高，乌海及巴彦淖尔西部偏低”的格局。高值区依托林草集中的生态优势，低值区受未利用地与耕地主导的用地结构制约。区域响应上，前套平原因建设用地挤占小幅下降，后套平原依托耕地稳定性维持稳态，沙漠及荒漠草原带因生态修复局部上升，为分区域生态保护划定提供精准导向。

（3）耕地、林地、草地与水域是区域生态服务的核心供给载体，其转化直接主导ESV损益格局且区域差异显著：生态修复区4类用地向优质生态地类转化，对ESV增长贡献率达93.2%；农业与城镇密集区4类用地向低价值地类转化，对ESV下降贡献率占86.5%。这一规律明确了不同区域ESV提升的关键靶向，印证核心生态用地保护是维系区域生态价值稳定的核心路径。

（4）2035年多情景模拟下，生态保护情景为最优路径。毛乌素沙地、库布其沙漠北缘及荒漠草原带草地修复成效显著，ESV大幅增长；城镇发展情景下前套平原建设用地扩张将挤占优质生态与农业用地，耕地保护情景聚焦后套平原耕地优化，均可能牺牲边缘生态空间；自然发展情景维持现有格局稳态。建议推行生态导向的国土空间规划，在沙漠边缘、荒漠草原划定生态红线，严格保护乌海及巴彦淖尔西

部未利用地的生态本底功能,限制大规模耕地开垦与无序城镇扩张;仅在矿业城镇等已有发展基础的区域,适度利用局部条件适宜的未利用地进行城镇配套建设,且需同步落实防风固沙、水资源节约等生态保护措施。建立分区域动态调控机制,保障生态安全与高质量发展协同推进。

参考文献(References)

[1] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Ecological Economics, 1998,25(1):3-15.

[2] 雷金睿,陈宗铸,陈小花,等.1980—2018年海南岛土地利用与生态系统服务价值时空变化[J].生态学报,2020,40(14):4760-4773.
Lei Jinrui, Chen Zongzhu, Chen Xiaohua, et al. Spatio-temporal changes of land use and ecosystem services value in Hainan Island from 1980 to 2018 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(14):4760-4773.

[3] 傅伯杰,张立伟.土地利用变化与生态系统服务:概念、方法与进展[J].地理科学进展,2014,33(4):441-446.
Fu Bojie, Zhang Liwei. Land-use change and ecosystem services: Concepts, methods and progress [J]. Progress in Geography, 2014,33(4):441-446.

[4] 欧阳志云,郑华.生态系统服务的生态学机制研究进展[J].生态学报,2009,29(11):6183-6188.
Ouyang Zhiyun, Zheng Hua. Ecological mechanisms of ecosystem services [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009,29(11):6183-6188.

[5] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报,2003,18(2):189-196.
Xie Gaodi, Lu Chunxia, Leng Yunfa, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2003,18(2):189-196.

[6] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J].自然资源学报,2008,23(5):911-919.
Xie Gaodi, Zhen Lin, Lu Chunxia, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China [J]. Journal of Natural Resources, 2008,23(5):911-919.

[7] 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 Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, 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.

[8] Fritz S, See L, Perger C, et al. A global dataset of crowdsourced land cover and land use reference data [J]. Scientific Data, 2017,4:170075.

[9] 李胡跃,戴全厚,胡泽银,等.黔中城市群生态系统服务价值评估及预测[J].水土保持研究,2024,31(4):248-257.
Li Huyue, Dai Quanhou, Hu Zeyin, et al. Evaluation and prediction of ecosystem service value in urban agglomeration of central Guizhou [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(4):248-257.

[10] 杨鸿魁,李业,马玉欣,等.基于FLUS-InVEST模型的黑河流域三生空间生境质量演变及多情景模拟预测[J/OL].[2026-03-06].环境科学,1-22. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202508108.
Yang Hongkui, Li Ye, Ma Yuxin, et al. Evolution and multi-scenario simulation prediction of habitat quality of production living ecological spaces in the Heihe River basin based on the Flus-Invest Model [J/OL]. [2026-03-06]. Environmental Science, 1-22. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202508108.

[11] 王宝怡,姚张锦阳,李玉凤,等.基于InVEST-CA-Markov多模型耦合的江苏省沿海碳储量时空异质性研究[J/OL].[2026-03-06].生态与农村环境学报,1-20. https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2025.0508.
Wang Baoyi, Yao Zhangjinyang, Li Yufeng, et al. Spatio-temporal heterogeneity of carbon storage in coastal Jiangsu Province based on the coupled InVEST-CA-Markov multi-model approach. [J/OL]. [2026-03-06]. Journal of Ecology and Rural Environment, 1-20. https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2025.0508.

[12] Liang Xun, Huang Junlong, Guan Qingfeng. Unveiling land competition through interaction networks: A consistency-based mining and simulation model that integrates inhibiting effects of land uses [J]. Landscape and Urban Planning, 2025,263:105458.

[13] 郭兰博,陈心旸,王爱国,等.基于intPLUS模型的土地利用模拟及生态系统服务价值评估:以河南省资源型城市为例[J/OL].[2026-03-12].环境科学与技术,1-15. https://link.cnki.net/urlid/42.1245.X.20251113.0849.002.
Guo Lanbo, Chen Xinyang, Wang Aiguo, et al. Multi-scenario simulation of land use and ecosystem service value valuation based on intPLUS model: A case study of resource-based cities in Henan Province [J/OL]. [2026-03-12]. Environmental Science & Technology, 1-15. https://link.cnki.net/urlid/42.1245.X.20251113.0849.002.

[14] 张宇,陈宇轩,高志鹏,等.基于土地利用变化的鄂尔多斯市生态系统服务价值时空演化特征分析[J].干旱区资源与环境,2025,39(2):131-140.
Zhang Yu, Chen Yuxuan, Gao Zhipeng, et al. Characteristics of spatio-temporal evolution of ecosystem

service value in Ordos City based on land-use change [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2025,39(2):131-140.

[15] Liang Xun, Guan Qingfeng, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2021,85:101569.

[16] 段炼,卢明深,蔡耀君,等.海上丝绸之路经济带中国沿线省市生态系统碳储量演化分析与预测[J].水土保持学报,2024,38(1):242-254.
Duan Lian, Lu Mingshen, Cai Yaojun, et al. Analysis and prediction of ecosystem carbon storage evolution in Chinese provinces and cities along the maritime silk road economic belt [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(1):242-254.

[17] 周颖,靳峰,王淑娟,等.基于PLUS模型的甘肃省土地利用和生态系统服务价值时空演变模拟与预测[J].福建农林大学学报(自然科学版),2026,55(2):151-161.
Zhou Ying, Jin Feng, Wang Shujuan, et al. Simulation and prediction of spatiotemporal evolution of land use and ecosystem service value in Gansu Province based on the PLUS model [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2026,55(2):151-161.

[18] 曲宝融,黄珺嫦,李玲,等.基于PLUS模型的河南省土地利用冲突识别和多情景演化模拟[J/OL].[2026-03-06].环境科学,1-19.https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202507025.
Qu Baorong, Huang Junchang, Li Ling, et al. Land use conflict identification and multi-scenario simulation evolution in Henan Province based on the PLUS model [J/OL]. [2026-03-06]. Environmental Science, 1-19. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202507025.

[19] 高伟,李欣悦,张远,等.长江流域生态系统服务价值时空演变与预测[J].生态学报,2023,43(15):6203-6211.
Gao Wei, Li Xinyue, Zhang Yuan, et al. Evolution and prediction of ecosystem service values of the Yangtze River basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(15):6203-6211.

[20] 曾勇,毕钰,张洪彬,等.塔里木河流域生态系统服务价值与土地利用的动态变化[J].干旱区地理,2026,49(2):265-274.
Zeng Yong, Bi Yu, Zhang Hongbin, et al. Dynamic changes of ecosystem service value and land use in the Tarim River basin [J]. Arid Land Geography, 2026,49(2):265-274.

[21] 牛统莉,熊立华,陈杰,等.基于PLUS模型的长江流域土地利用变化模拟与多情景预测[J].武汉大学学报(工学版),2024,57(2):129-141.
Niu Tongli, Xiong Lihua, Chen Jie, et al. Land use simulation and multi-scenario prediction of the Yangtze River basin based on PLUS model [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2024,57(2):129-141.

[22] 吴向莹,游智,杨曾慧子,等.长江中下游矿冶流域生态系统服务价值时空演变与多情景模拟[J].环境科学与技术,2025,48(增刊1):179-193.
Wu Xiangying, You Zhi, Yang Zenghuizi, et al. Spatiotemporal evolution and multi-scenario simulation of ecosystem service value in the middle and lower reaches of Yangtze River mining and metallurgy basin [J]. Environmental Science & Technology, 2025, 48(S1): 179-193.

[23] 王子懿,洪敏,刘晓峰.黄河中游土地利用时空变化格局与趋势预测[J].遥感技术与应用,2025,40(3):748-760.
Wang Ziyi, Hong Min, Liu Xiaofeng. Spatial and temporal change pattern and trend prediction of land use in the middle reaches of the Yellow River [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2025, 40(3): 748-760.

[24] 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 Lu, Xiang Yanyun, Zhang Qifei, 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.

[25] 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 Chunxia, Zhong Shaozhuo, Long Yu, 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.

[26] 王建鹏,彭叶林,郑亮,等.长江黄河流域生态系统服务时空特征及驱动因素[J].水土保持研究,2025,32(5):341-351.
Wang Jianpeng, Peng Yelin, Zheng Liang, et al. Spatiotemporal characteristics and driving factors of ecosystem services in Yangtze River and Yellow River basins [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(5):341-351.

[27] 付乐,王胜利,张丽苹,等.巴彦淖尔市生态系统服务价值演化分析[J].中国水土保持科学,2025,23(3):85-97.
Fu Le, Wang Shengli, Zhang Liping, et al. Evolutionary analysis of ecosystem service value in Bayannur City [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025,23(3):85-97.