黄河流域生态系统服务价值时空演变：因子修正、驱动力与交互效应

胡世玉，刘　东*，施星宇，杨璐瑶
中国科学院大学资源与环境学院，北京 101408

摘　要：黄河流域生态保护和高质量发展是国家重大战略，科学评估其生态系统服务价值（ecosystem service value，ESV）及其驱动机制是实现区域生态保护与可持续发展的关键前提。现有研究多依赖静态或局部参数修正的当量因子，难以捕捉ESV随生态系统结构与社会经济条件动态演化的响应特征；且对ESV空间分异的多因子交互驱动机制缺乏定量解析。为此，本文在因子本地化校准基础上，建立动态修正的ESV当量因子框架，对2000～2020年黄河流域ESV进行多期动态核算；结合地理探测器模型，识别ESV空间分异的主导驱动因子及其交互效应。结果表明：①2000～2020年黄河流域ESV总体呈“上升－下降－回升”的波动增长趋势（增幅13.3%），上、中游变化趋势与全流域基本一致，下游ESV持续下降且降幅呈扩大趋势，表现出“上中游改善、下游退化”的区域分异特征。②ESV空间分布呈“西高东低、南高北低”的格局。热点区（高值聚类）显著收缩，冷点区（低值聚类）有所扩大，且呈“中下游扩张、上游收缩”趋势。③土地利用类型是ESV空间分异的主要驱动因子，任意双因子交互作用的解释力均高于单因子，表现为双因子增强效应，凸显自然环境因子与社会经济因素的协同驱动机制。④土地利用类型与其他因子的交互作用最突出，但呈减弱趋势，反映了黄河流域ESV空间分异正从“单一强约束驱动”向“多目标综合主导”转变。

收稿日期：2026-03-04　**录用日期：**2026-03-16
基金项目：土地利用变化对西辽河流域农牧系统氮素流动的影响及环境效应研究（41671525）、中国东部新生代陆相湖盆和深部碳释放对气候环境影响评价的数值模型（2023YFF0804304-4）
第一作者：胡世玉，女，硕士研究生，研究方向：土地利用与区域发展，E-mail：hushiyu23@mails.ucas.ac.cn
通讯作者：刘东，男，副教授，研究方向：资源环境遥感与区域发展，E-mail：lldking@ucas.ac.cn

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

本研究通过当量因子动态修正，阐明了多因子交互驱动下的ESV空间分异规律，揭示了黄河流域ESV“格局稳定–阶段分异–机制转型”的演化过程，可为流域国土空间精准管控、生态安全格局优化及生态保护–与高质量发展协同路径设计提供量化依据与决策参考。

关键词：生态系统服务价值；动态当量因子；时空分异；交互效应；黄河流域

DOI：10.3724/j.issn.2097-4221.2025.04.002

CSTR：32284.14.issn.2097-4221.2025.04.002

引　言

生态系统通过提供物质产品与服务，为人类生存与发展提供不可替代的福祉基础[1]。然而，随着工业化和城镇化进程的加快，人类活动对生态系统的干扰强度持续加剧，显著削弱了生态系统的服务功能。科学评估生态系统服务价值（ecosystem service value，ESV）及其驱动机制，不仅能揭示自然和人类活动对生态系统的影响，更为构建生态安全格局、推进生态文明建设提供量化依据[2-3]。

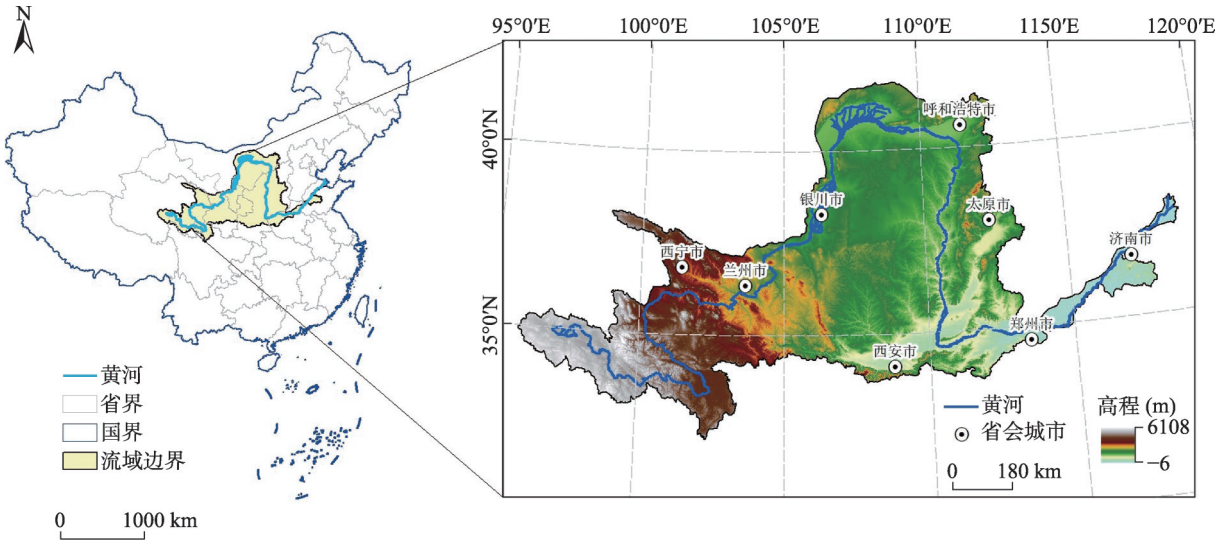
ESV评估研究始于1997年Costanza等对全球生态系统服务价值的开创性货币化测算[1]。随后，谢高地等[4-5]构建了中国陆地生态系统服务价值的评估体系，该体系被广泛应用于区域ESV研究[6-9]。亚马孙流域[10]、密西西比河流域[11]及长江流域[12]等重要区域的案例研究，进一步印证了ESV评估在解析生态环境演变规律中的关键作用。然而，既有研究仍存在明显局限：其一，多依赖静态或有限修正因子，未能结合不同时期生态系统结构与社会经济的动态变化对ESV当量表进行适应性调整；其二，侧重时间序列的静态评估，对ESV空间分异格局及其驱动机制的解析不足，尤其缺乏对多因子交互效应的定量探讨。

黄河流域作为我国重要的生态安全屏障与经济高质量发展轴带，其生态本底状况直接关系国家生态安全与区域协调发展全局[13-14]。2021年《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》，将其上升为国家重大战略部署，明确要求“坚持生态优先、绿色发展”[15]。在此背景下，精准量化黄河流域ESV动态演变、解析其空间分异驱动机制，对其生态保护和高质量发展具有重要意义。基于此，本文突破传统静态评估框架，通过构建动态修正的ESV当量因子，系统解析2000~2020年黄河流域ESV时空演变规律，定量识别其空间分异的主导驱动因素及多因子交互效应，以期为黄河流域国土空间优化、生态安全保障与高质量发展路径设计提供科学支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河（东经96°~119°，北纬32°~42°）是中国第二长河流，发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓，流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南和山东9省（区），干流全长5464km，流域总面积$7.95\times10^5km^2$（图1）。流域内气候属典型的大陆性季风气候，空间分异显著：年平均降水量自东南向西北递减（116~1038mm），年均气温由南向北降低（−13~15℃），东南部（如河南、山东）水热条件优于西北部（如宁夏、内蒙古）。生态系统类型多样，以耕地和草地为主，并包含林地、湿地、荒漠等多种生态系统类型，形成了复杂的水源涵养、水土保持与生物多样性维持功能体系[16]。近20年来，伴随工业化与城镇化的快速推进，流域内建设用地扩张、水资源过度开发等问题凸显，导致部分区域生态系统服务功能退化，给区域可持续发展带来严峻挑战。



基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS（2019）1822号的标准地图制作，底图边界无修改，下同。

图1 黄河流域地理位置图

1.2 数据来源

本研究综合运用多源地理空间数据与社会经济统计数据，数据来源如下：

①土地利用与覆被数据、DEM、气象数据（年降水量、年均温）、植被指数（NDVI）、植被类型、夜间灯光、土壤类型，均来自中国科学院资源环境科学与数据中心（https：//www.resdc.cn/），空间分辨率为1km×1km。土地利用数据涵盖2000年、

2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年，根据研究区实际情况，将土地利用类型划分为耕地、林地、草地、湿地、水域、建设用地和未利用地 7 类。

②净初级生产力（NPP）数据来自国家地球系统科学数据中心（https：//www.geodata.cn/），空间分辨率为 1km×1km。

③社会经济数据主要来源于《中国统计年鉴》（2001~2021 年）及各省统计年鉴，涵盖农作物播种面积与产量、恩格尔系数、城镇化率、人口总量等指标。

2　研究方法

2.1　自然生态系统服务价值的测算与动态因子修正

单位面积价值当量因子是评估 ESV 的核心参数。现有研究多直接采用谢高地等 [5] 提出的全国单位面积生态系统服务价值当量表，但它基于中国平均生态条件构建，未考虑区域生态系统结构和功能的空间异质性（如气候条件、生物多样性差异），若直接套用，易造成评估偏差。为此，本研究结合研究区生态特征对原始当量表进行本地化修正。

依据“标准生态系统服务当量的经济价值等于单位农田粮食生产经济价值的 1/7”的原则 [5]，结合研究区实际农田平均产值，重新标定标准当量价值［式（1）］：

$$E_a = \frac{1}{7}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{m_i p_i q_i}{M}\right) \tag{1}$$

式中，E_a 为一个标准当量因子的生态系统服务价值量，元/hm^2；n 为研究区主要粮食作物种类数；M 为粮食作物总种植面积，hm^2；m_i、p_i、q_i 分别为第 i 种粮食作物的种植面积（hm²）、单价（元/kg）和单位面积产量（kg/hm²）。

生态系统服务价值的计算通常采用当量因子法，其基本公式为：

$$\mathrm{ESV} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{m}\left(A_i \times \mathrm{EC}_{ik} \times E_a\right) \tag{2}$$

式中，ESV 为生态系统服务总价值，元；i 为土地利用类型（共 n 种）；k 为生态系统服务类型（共 m 种）；A_i 为第 i 种土地利用类型的面积，hm^2；EC_{ik} 为第 i 种土地利用类型的第 k 种生态系统服务的当量因子；E_a 为一个标准当量因子的生态系统服务价值量，元/hm^2。

传统 ESV 计算［式（2）］仅考虑土地利用类型与面积的静态影响，而未体现生态系统质量差异（如生物量差异）和社会经济条件（如经济发展水平）的动态作用。为此，本研究在传统计算公式的基础上，参考已有文献 [17-19]，引入生物量调节系数（R）和社会经济调节系数（PI）构建时空动态 ESV 评估模型［式（3）］。

$$\mathrm{ESV}=\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{m}\left(A_i\times \mathrm{EC}_{ik}\times E_{\mathrm{a}}\times R\times \mathrm{PI}\right) \tag{3}$$

式中，R为生物量调节系数；PI为社会经济调节系数；其他参数同式（2）。

（1）生物量调节系数（R）计算方法

本研究采用Thornthwaite Memorial模型估算NPP[20]，计算公式如下：

$$R=\frac{\mathrm{NPP_y}}{\mathrm{NPP_c}} \tag{4}$$

$$\mathrm{NPP}=3000[1-\mathrm{e}^{-0.0009695(V-20)}] \tag{5}$$

$$V=\frac{1.05\mathrm{Pre}}{\sqrt{1+\left(1+1.05\mathrm{Pre}/L\right)^2}} \tag{6}$$

$$L=3000+25\mathrm{Tmp}+0.05\mathrm{Tmp}^3 \tag{7}$$

式中，$\mathrm{NPP_y}$和$\mathrm{NPP_c}$分别表示研究区和中国的植被净初级生产力，t/（$\mathrm{hm^2}$·a）；NPP为自然植被净初级生产力，t/（$\mathrm{hm^2}$·a）；V为年平均实际蒸散量，mm；L为年平均最大蒸散量，mm；Pre为年降水量，mm；Tmp为年平均气温，℃。

（2）社会经济调节系数（PI）计算方法

本研究考虑经济发展水平、居民收入状况和居民消费偏好等因素，将支付意愿和支付能力纳入ESV当量因子的修订中：

$$\mathrm{PI}=W_{\mathrm{t}}A_{\mathrm{t}} \tag{8}$$

$$W_{\mathrm{t}}=\frac{W_{\mathrm{s}}}{W_{\mathrm{g}}} \tag{9}$$

$$W=\frac{2}{1+\mathrm{e}^{-m}} \tag{10}$$

$$m=\frac{1}{En}-2.5 \tag{11}$$

$$En=En_{\mathrm{r}}\left(1-P_{\mathrm{u}}\right)+En_{\mathrm{u}}P_{\mathrm{u}} \tag{12}$$

$$A_{\mathrm{t}}=\frac{\mathrm{GDP_{ms}}}{\mathrm{GDP_m}} \tag{13}$$

式中，W_{t}为支付意愿；A_{t}为支付能力；W为计算支付意愿W_{t}的参数；W_{s}和W_{g}分别表示研究区和中国的支付意愿参数；En为恩格尔系数，En_{r}和En_{u}分别为农村和城市的恩格尔系数；P_{u}为城市人口占比，%；m为社会发展阶段系数；$\mathrm{GDP_{ms}}$和$\mathrm{GDP_m}$分别表示研究区和全国人均GDP，元/人。

2.2 地理探测器

地理探测器（geodetector）是一种基于空间分异性的统计学方法，通过量化自变量对因变量的解释力（q值）揭示驱动因子的重要性[21]。它通过空间异质性来探测各要素对因变量的驱动力，并使用q统计量进行衡量，值域为［0，1］，q值越大说明自变

量对因变量的解释力越强，即地理要素的空间分异性越显著。本研究采用R语言最优地理探测器包（Optimal Geodetector），结合因子探测（Factor Detector）和交互探测（Interaction Detector）模块，解析黄河流域ESV的主导驱动因子及其协同作用机制（表1[21]）。计算公式如下：

表1　双因子交互作用类型[21]

判断依据	交互作用
$q(x_1 \cap x_2) < \min\left[q(x_1), q(x_2)\right]$	非线性减弱
$\min\left[q(x_1), q(x_2)\right] < q(x_1 \cap x_2) < \max\left[q(x_1), q(x_2)\right]$	单因子非线性减弱
$q(x_1 \cap x_2) > \max\left[q(x_1), q(x_2)\right]$	双因子增强
$q(x_1 \cap x_2) = q(x_1) + q(x_2)$	独立
$q(x_1 \cap x_2) > q(x_1) + q(x_2)$	非线性增强

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2}\sum_{n=1}^{L} N_{\mathrm{h}}{\sigma_{\mathrm{h}}}^2 \tag{14}$$

式中，N_{h}和N分别为h区和全区的单元数；${\sigma_{\mathrm{h}}}^2$和σ^2分别为h区和全区ESV值的方差；L为变量Y或因子X的分区/分层。

3　结果与分析

3.1　黄河流域ESV时间变化

2000~2020年间，黄河流域ESV呈“上升－下降－再上升”的波动趋势（表2）。流域ESV总值从2000年的7213.96亿元增至2020年的8317.63亿元，增长约15.30%。其中，2000~2005年快速上升，增幅达15.30%；2005~2010年增速趋缓（增幅6.2%）；2010~2015年出现负增长（降幅9.74%），2015~2020年又逐步回升（增幅4.32%）。

从上、中、下游看，上游和中游贡献了流域ESV总量的98.7%，且两者变化趋势与全流域高度同步。其中，上游ESV由2000年的4182.36亿元增至2020年的5032.84亿元，增幅20.33%；中游ESV总体增幅10.08%，但2010年后增速明显放缓。相比之下，下游ESV整体呈下降趋势，20年间降幅达46.3%，尤其2015~2020年最为明显（骤降38.58%），与上游、中游的相对稳定形成鲜明对比，凸显黄河流域生态保护存在显著的“上中游改善、下游退化”的分异特征。土地利用转移过程验证了上述ESV演变趋势（图2）：上游和中游以生态恢复为主导。上游耕地和未利用地分别减少1931km^{2}和8788km^2，主要向草地转移（净增3145km^2）。同时，林地、湿地和水域也分别增加1812km^2、1165km^{2}和536km^2；中游呈现类似特征，耕地大幅减少（－10359km^2），林

地（2211km^2）和草地（1516km^2）显著增加，区域生态建设（如退耕还林还草）对ESV的正向驱动效应显著。与上、中游不同，下游则表现出明显的城市扩张特征。林地、草地分别减少151km^{2}和977km^2，建设用地增加3438km^2。新增建设用地面积主要来源于耕地及林、草地等，直接挤占生态系统服务供给空间，导致下游ESV降低。

表2 2000~2020年黄河流域ESV及变化率

位置	ESV总值/10^8元					变化率/%				
	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	2000~2005	2005~2010	2010~2015	2015~2020	2000~2020
上游	4182.36	4817.72	5124.61	4662.96	5032.84	15.19	6.37	−9.01	7.93	20.33
中游	2938.63	3398.70	3608.36	3228.85	3234.87	15.66	6.17	−10.52	0.19	10.08
下游	92.97	101.14	100.14	81.29	49.93	8.79	−0.98	−18.83	−38.58	−46.30
黄河流域	7213.96	8317.56	8833.12	7973.10	8317.63	15.30	6.20	−9.74	4.32	15.30

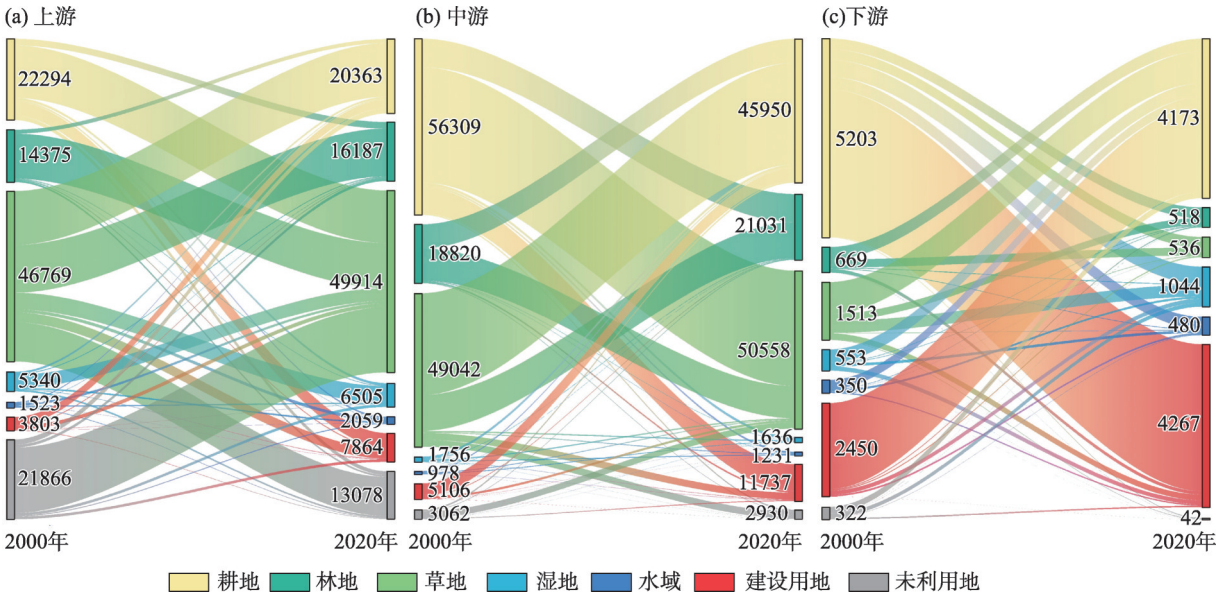
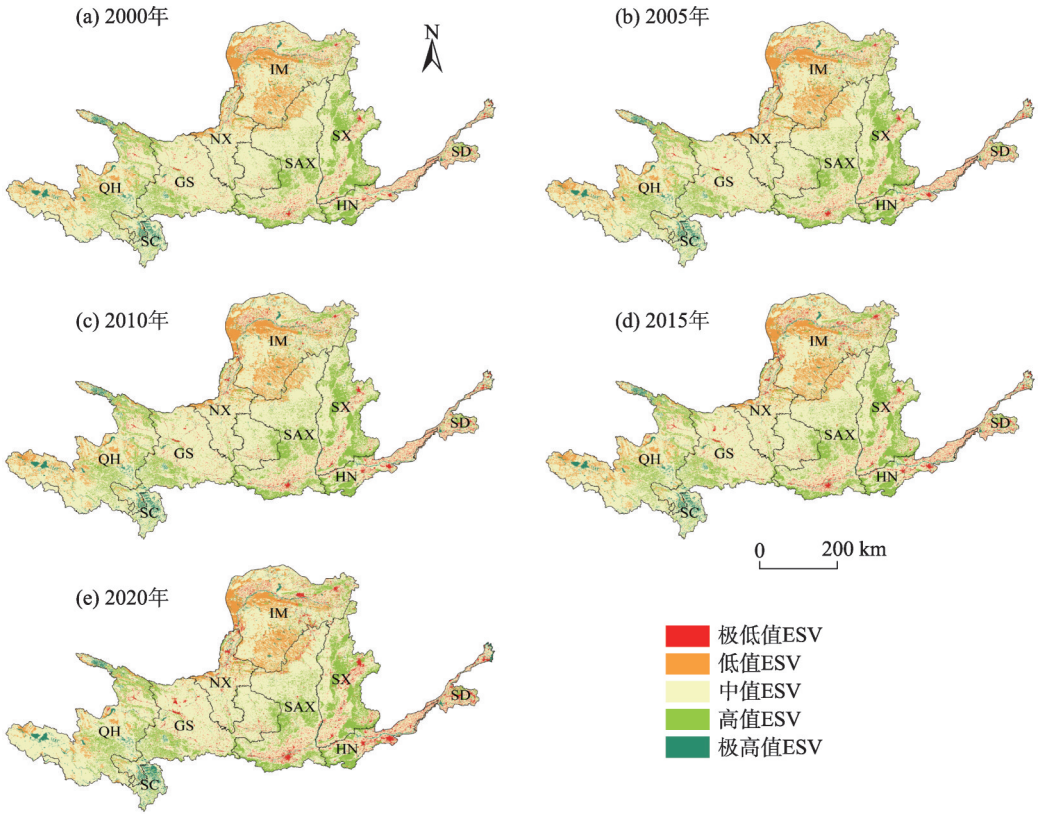


图2 2000~2020年黄河流域上、中、下游土地利用类型转移（单位：km^2）

3.2 黄河流域ESV空间变化

为保证多期空间格局对比的可比性，本研究构建统一分级阈值。以研究期各类土地单位面积ESV系数均值的平均值（用A表示）为基准，将ESV划分为极低值（<0）、低值（0~0.1A）、中值（0.1A~0.5A）、高值（0.5A~1.5A）和极高值（>1.5A）五级。据此绘制不同年份的黄河流域ESV空间分布图（图3）。2000~2020年黄河流域ESV呈现显著的“西高东低、南高北低”空间格局。极高值区、高值区主要分布在青甘川三省交界及陕晋豫地区；低值区则密集分布于宁夏北部及内蒙古河套平原广大地区，形成连片态势；极低值区主要散布于山东、陕西南部、山西西南部及河南中东部地区，呈

点状分布。2000 年以来，低值区与极低值区呈向外扩张趋势，各省形成了一个或多个极低值中心，尤以河南、山东等省最为显著，这与经济快速发展、城市建设用地急剧扩张紧密相关。这一系列变化凸显了快速城市化进程下保护生态系统的重要性。



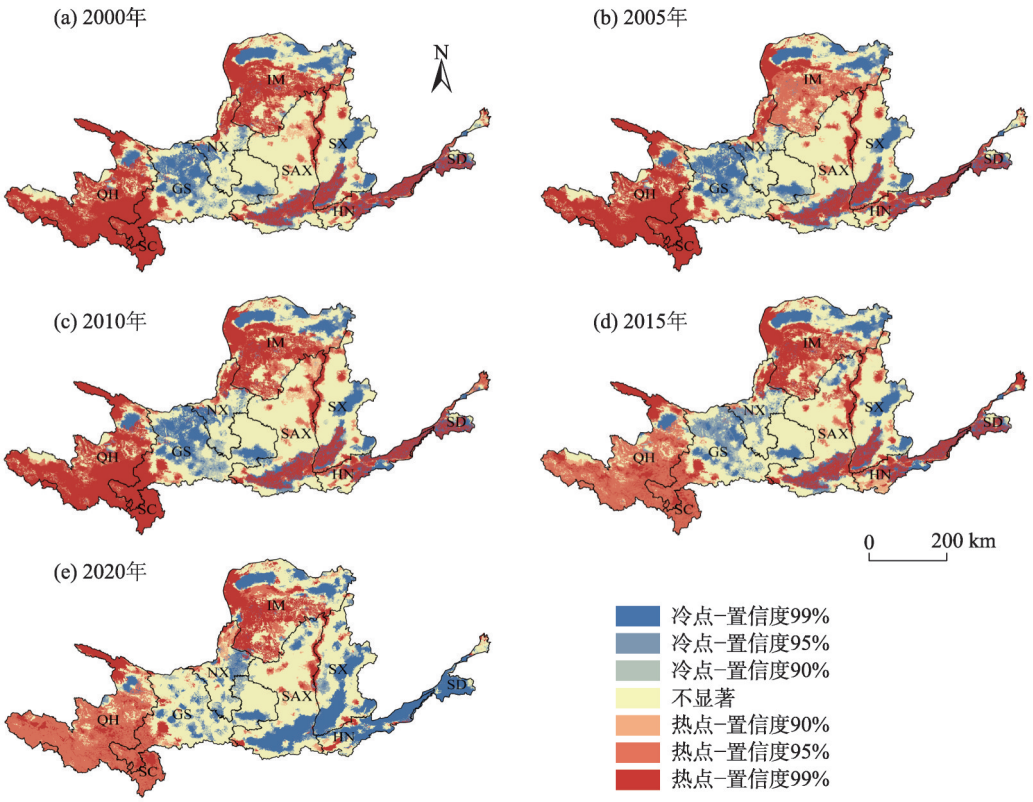
注：SC、QH、NX、GS、HN、SX、IM、SD 和 SAX 分别代表四川、青海、宁夏、甘肃、河南、山西、内蒙古、山东和陕西

图 3　黄河流域 ESV 空间分布

从高低值空间分异看（图 4），黄河流域 ESV 热点区（高值聚类区）整体收缩，主要集中在青甘川交界处、陕晋豫交界处以及内蒙古南部。这些区域植被覆盖率高，生态系统服务价值水平较高。冷点区（低值聚类区）则呈现“中下游扩张、上游收缩”的分异。2015 年前，陕西南部、山西西南部以及河南和山东地区等中下游区域呈现冷热混合状态，但 2020 年后，这些区域低值聚集明显，呈扩张趋势。与此同时，甘肃和宁夏等上游区域的冷点区整体缩小，基本转变为不显著区域，表明这些地区的 ESV 高值聚类逐渐增强，生态环境质量得到了明显改善和优化。

为进一步揭示极值区域形成机制，本文选取代表性极值区——下游的郑州市附近低值集聚区（图 5 黑线框）和上游的玛曲-若尔盖交界处高值集聚区（图 5 蓝线框），分析其土地利用结构与 ESV 的变化特征（表 3）。

2000~2020 年间，极低值区 ESV 由－4.29 亿元下降至－38.86 亿元，净减少 34.57 亿



注：SC、QH、NX、GS、HN、SX、IM、SD和SAX分别代表四川、青海、宁夏、甘肃、河南、山西、内蒙古、山东和陕西

图4 黄河流域ESV冷热点空间分布

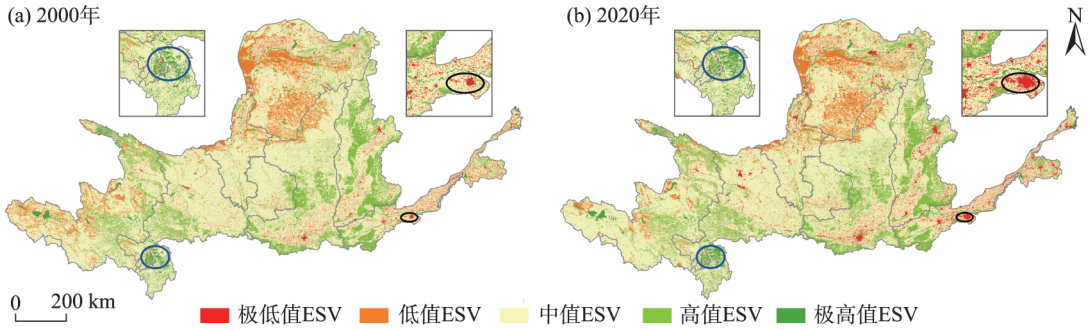


图5 代表性极低值区与极高值区

元，表明区域生态系统服务功能显著退化。该区域生态用地（耕地、林地、草地、湿地和水域）面积均呈减少趋势，其中湿地和草地降幅较为明显，超过50%；而建设用地面积由344km²增加至891km²，净增加547km²，增幅约159.01%。建设用地扩张对生态空间的持续挤占，是该区域ESV下降的主要原因。结合前文土地利用转移结果，下游地区建设用地主要来源于耕地及部分生态地类，高ESV生态空间被低ESV建设空间替代，进而形成连片分布的极低值中心。

相比之下，极高值区ESV由184.55亿元上升至259.29亿元，净增加74.74亿元，整

表 3　2000~2020 年代表性极值区土地利用面积及 ESV 变化

项目	生态用地类型	极低值区			极高值区		
		2000 年	2020 年	变化率/%	2000 年	2020 年	变化率/%
面积/km^2	耕地	1198.00	769.00	−35.81	2.00	2.00	0.00
	林地	37.00	19.00	−48.65	19.00	248.00	1205.26
	草地	133.00	61.00	−54.14	4773.00	4034.00	−15.48
	湿地	37.00	12.00	−67.57	2330.00	2843.00	22.02
	水域	11.00	8.00	−27.27	91.00	136.00	49.45
	建设用地	344.00	891.00	159.01	7.00	25.00	257.14
	未利用地	0.00	0.00	0.00	256.00	190.00	−25.78
ESV/亿元		−4.29	−38.86	−806.75	184.55	259.29	40.50

体生态系统服务功能增强。其中，林地增长最明显，面积由 19km^2增至 248km^2，增幅达 1205.26%；其次为水域和湿地，面积分别增加 45km^2和 513km^2，增幅分别为 49.45% 和 22.02%。草地与未利用地面积略有下降，但仍保持较大规模。该区域位于玛曲-若尔盖高原湿地草原生态区，生态基底良好，生态用地规模扩大使 ESV 持续提升，形成稳定的高值集聚区。总体来看，极低值区受建设用地扩张影响显著，极高值区则依托生态用地增加实现了服务功能提升。

3.3　黄河流域 ESV 空间分异驱动机制

结合数据的可获取性和典型性，基于地理探测器模型，本研究选取自然环境因子（DEM、坡度、NPP、NDVI、年均温、年降水量）和社会经济因子（GDP、人口密度、夜间灯光指数、人类活动足迹指数、距道路距离、土地利用类型），系统解析黄河流域 ESV 空间分异的驱动机理及多因子交互效应。

3.3.1　单因子驱动作用

单因子探测结果显示（图 6），研究期间各因子对黄河流域 ESV 空间分异的解释力（q 值）均通过显著性检验（p<0.05），但解释强度存在明显差异。土地利用类型（X12）始终为主导驱动因子，2000~2010 年 q 值均超过 0.80，虽然 2015 年和 2020 年分别降至 0.55 和 0.54，但整体仍显著高于其他因子。DEM（X1）、年均温（X5）、GDP（X7）、人口密度（X8）和人类活动足迹指数（X10）的 q 值介于 0.2~0.5 之间。其中，DEM 和年均温的 q 值分别维持在 0.27~0.32 和 0.26~0.31 之间，解释力较为稳定；但 GDP 由 0.23 上升至 0.35，人口密度由 0.25 增至 0.32，人类活动足迹指数由 0.24 增至 0.33，呈增强趋势。相比之下，其他因子的 q 值普遍低于 0.20，对 ESV 空间分异的解释作用相对有限。

从时间维度上看，自然环境因子的 q 值变化相对稳定，而土地利用类型的 q 值呈显著下降趋势，反映其作为 ESV 空间分异核心驱动力的直接解释力随时间衰减；与之相

反，其他社会经济因子的q值整体呈上升趋势，其中GDP增幅最显著，表明人类活动对生态环境的干扰强度持续增强，未来需加强良性引导以实现生态保护与利用的平衡。

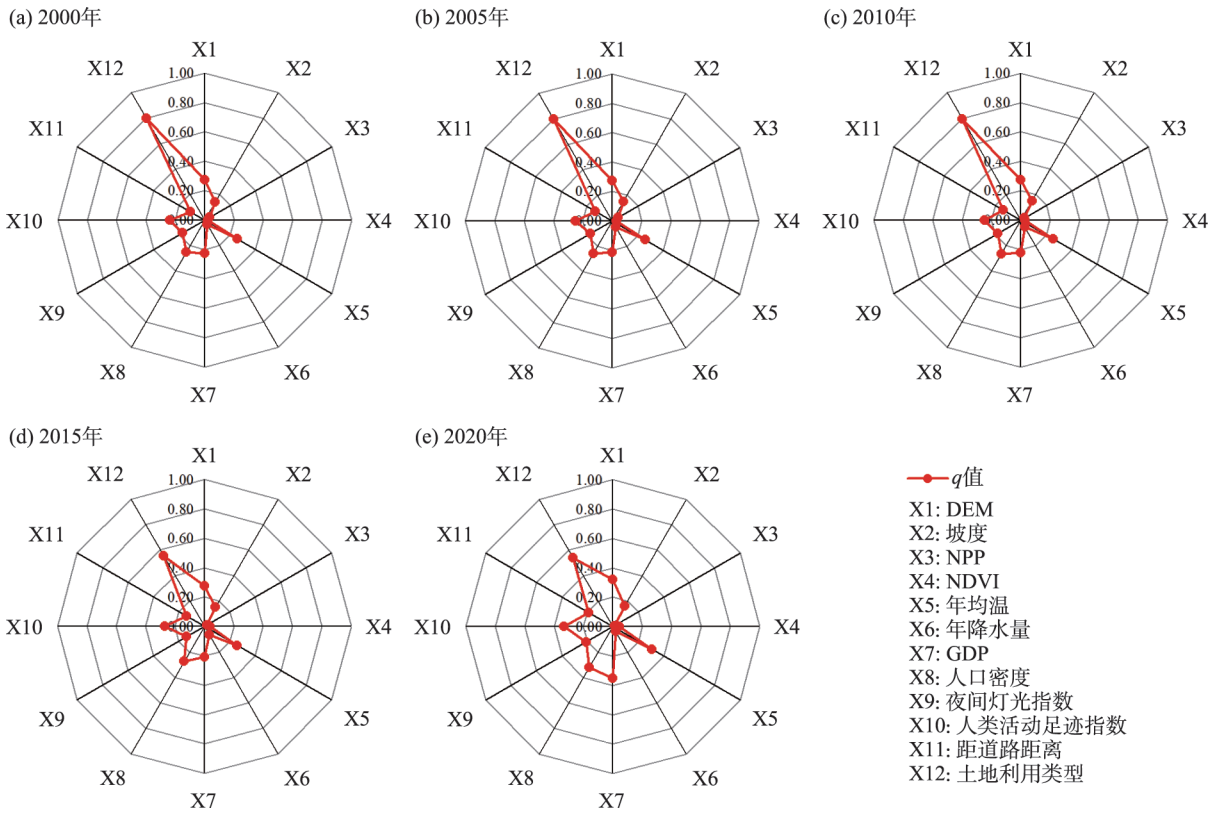


图6 黄河流域ESV空间分异驱动因子解释力

3.3.2 因子交互效应

因子交互效应进一步揭示了ESV空间分异的复合驱动机制（图7），研究区任意两因子的协同作用q（A∩B）均大于单因子的作用q（A）或q（B），且以双因子增强效应为主｛q（A∩B）>max［q（A），q（B）］｝，说明ESV空间分异是自然环境因素与社会经济因素协同作用的结果。

整体来看，土地利用类型与其他因子的交互作用尤为突出。2000年，土地利用类型与DEM的交互解释力达0.83，反映了地形通过限制土地利用类型分布间接影响ESV；2005~2010年，土地利用类型与人口密度的交互解释力为0.83，凸显人口集聚通过推动土地利用转换间接驱动ESV空间变化；2015~2020年，土地利用类型与人类活动足迹指数的交互解释力大于0.70，表明高强度人类活动（如城市扩张）对ESV的叠加胁迫。值得注意的是，土地利用类型与其他因子的这种交互作用随时间呈显著减弱趋势，与3.3.1中土地利用类型单因子q值下降一致，反映单个因子直接解释力被“稀

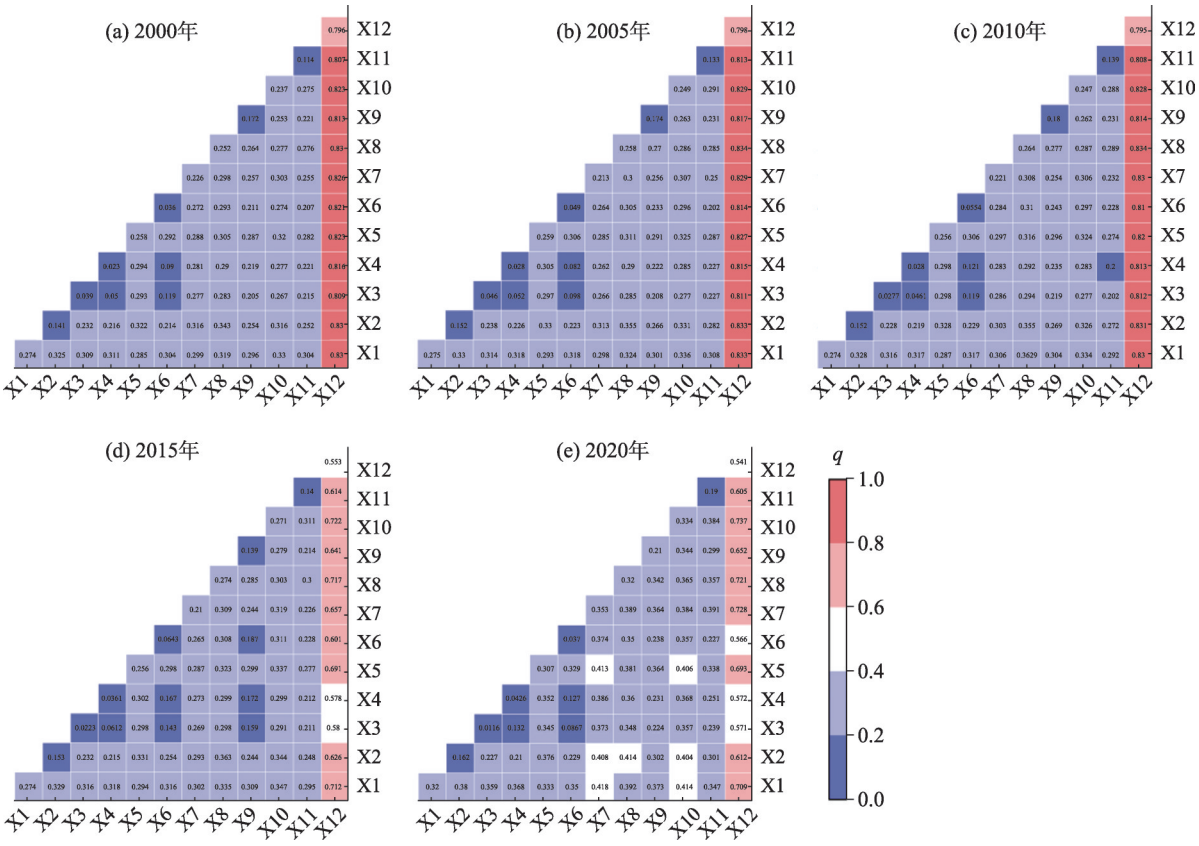


图 7　黄河流域ESV空间分异双因子探测分析

释”，近20年来黄河流域ESV空间分异正从“单一强约束驱动”向“多目标综合主导”转变。

自然环境因子与社会经济因子之间存在着协同增强关系。DEM、坡度等自然环境因子与多数社会经济因子的交互值相对稳定，表明地形作为本底因素持续调节人类活动对ESV的影响强度与方式。然而，自然环境因子（如年降水量、年均温）与社会经济因子（如GDP、人口密度）的交互q值（0.16~0.83）显著高于自然环境因子内部交互q值（0.01~0.38），说明在自然环境本底上，人类通过土地利用转型等活动干扰增强了ESV的空间分异，这也定量印证了“生态-发展”系统存在紧密的耦合关系。因此，未来的国土空间规划需结合单因子驱动与多因子交互增强效应，通过多元化协调策略（如分区管控、政策组合）促进生态保护与高质量发展协同共生。

4　讨　论

4.1　黄河流域ESV时空格局演变及分异特征

本研究通过构建动态修正的生态系统服务价值（ESV）当量因子，系统评估了

2000~2020年黄河流域ESV时空演变规律及驱动机制。结果表明，近20年来黄河流域ESV的空间分布格局总体稳定，呈现“西高东低、南高北低”的基本特征，与Zhou等[22]的研究结果一致。这与流域自然地理梯度及生态系统类型分布切合。ESV极高值区与高值区主要分布于青甘川三省交界及陕晋豫地区，这些区域以森林、草地和水域等生态用地为主体，植被覆盖度较高，生态系统结构完整；宁夏北部引黄灌区、内蒙古河套平原及鄂尔多斯高原构成低值连绵区，与灌溉农业扩张和水资源过度开发相关；山东、河南中东部的极低值区呈点状散布，2020年进一步扩张为省域极低值中心，这与城市建设用地侵占耕地、林地、草地的过程高度吻合[23]。这种分布格局印证了“生态系统类型-服务功能-价值密度”的级联关系[1]。

值得注意的是，黄河流域ESV呈现“上中游改善、下游退化”的差异特征。上游（如三江源）因退耕还林工程[24]，故ESV升高，而下游（如黄淮海平原）因城市扩张[23]，故ESV下降。土地利用结构调整是驱动黄河流域ESV空间分异与时序演变的重要基础。我们发现，2000~2020年黄河流域土地利用结构发生显著调整，表现为建设用地持续扩张、耕地阶段性减少、林地和草地在生态工程推动下局部恢复。下游地区建设用地主要来源于耕地和部分林草地，上、中游地区则以耕地向林地、草地转化为主。土地利用转型的空间差异与ESV空间分布格局高度吻合：生态用地比重上升的区域多对应ESV提升区，而建设用地扩张集聚区则对应ESV下降中心。这一分异凸显了快速城市化背景下差异化可持续土地利用策略的紧迫性。上、中游需巩固生态工程成果，下游亟须遏制建设用地对耕地、湿地的侵占，通过“生态型土地整治”平衡发展与保护。

4.2 黄河流域ESV时间变化

黄河流域ESV时间演变呈现“上升－下降－回升”阶段特征，与以往的研究结果一致[25]，其驱动机制与政策干预强度高度相关。2000~2005年ESV快速上升，主要受益于2000年以来退耕还林还草政策的实施和植被覆盖度的显著提升，体现了政策对生态系统服务的正向激励；2005~2010年增速趋缓，可能与农业扩张导致的土地利用强度增加有关；2010~2015年出现负增长，此期间正值我国工业化加速期，人类活动强度增强，生态系统退化压力凸显；2015~2020年逐步回升，主要得益于生态文明建设战略推进，生态修复投入显著增加，生态环境逐渐恢复。

这一阶段性特征表明，黄河流域ESV演变是政策目标（开发/保护）与人类活动（生产/生活）动态博弈的结果，未来需通过“多目标协同规划”避免单一政策导向的负面效应。

4.3　黄河流域 ESV 驱动机制

本研究发现，土地利用类型是影响黄河流域 ESV 空间分异的首要驱动因素，但其解释力呈阶段性衰减，且它与其他因子的交互效应也呈显著减弱趋势。

土地利用类型作为 ESV 空间分异的主导驱动因子，其 q 值从 2000 年的 0.80 降至 2020 年的 0.54，反映其直接解释力被“稀释”。这一变化主要是其他社会经济因子独立作用增强的结果。比如，2000~2010 年，社会经济因子（如 GDP、人口密度）的 q 值< 0.27，需依赖与土地利用的交互（如人口集聚促使耕地转为建设用地）间接影响 ESV；2015~2020 年，社会经济因子（如 GDP、人类活动足迹指数）的独立解释力显著提升（GDP 的 q 值 0.21→0.35，人类活动足迹指数的 q 值 0.27→0.33），反映了产业结构升级、建设用地扩张等直接驱动 ESV 变化，部分替代了传统“土地利用中介”作用，导致土地利用类型的 q 值相对下降。这表明黄河流域 ESV 空间分异从“土地利用主导”到“多因子协同”的转变。

然而，尽管土地利用类型与其他因子的交互 q 值减弱，但自然环境因子（如年降水量、年均温）与社会经济因子（如 GDP、人口密度）的交互 q 值（0.16~0.83）仍显著高于自然环境因子内部的交互 q 值（0.01~0.38），反映了“自然本底-人类活动”的协同放大效应。因此，未来政策制定需突破“单因子管控”思维，综合考虑多种因素，通过多因子情景模拟预判 ESV 风险，实现生态保护与高质量发展协同。

5　结　论

本研究针对既有 ESV 评估多依赖静态或局部参数修正的当量因子，难以捕捉 ESV 随生态系统结构与社会经济条件动态演化的响应特征，且对 ESV 空间分异的多因子交互驱动机制缺乏定量解析的研究不足，构建了动态修正的 ESV 当量因子框架，并结合地理探测器模型，系统分析了 2000~2020 年黄河流域 ESV 时空演变特征、主导驱动机制及因子交互效应。主要结论如下：

（1）2000~2020 年黄河流域 ESV 总体呈“上升－下降－回升”的波动增长趋势，但阶段性差异显著。上游与中游贡献了流域 98.7% 的 ESV，变化趋势与全流域一致；下游则呈下降趋势，凸显“上中游改善、下游退化”的分异特征，反映退耕还林等生态工程与中、下游城市扩张的博弈效应。

（2）黄河流域 ESV 呈“西高东低、南高北低”的空间分布特征，低值区扩张与冷热点动态演化显著。ESV 极高值区与高值区主要分布于青甘川交界及陕晋豫地区；低值区沿宁夏北部、内蒙古河套平原连片扩张。2020 年下游极低值中心（山东、河南中

东部）与建设用地侵占高度吻合。热点区整体收缩，冷点区则呈现“中下游扩张、上游收缩”趋势。

（3）土地利用类型是黄河流域ESV空间分异的核心驱动因子。任意双因子交互的解释力均显著高于单因子，表现为双因子增强效应，自然环境因子与社会经济因子的交互解释力高于自然环境因子内部的交互解释力。土地利用类型与其他因子的交互作用最强，但呈减弱趋势，表明黄河流域ESV空间分异机制正由“单一强约束驱动”向“多目标综合主导”转型。

本研究基于动态修正的当量因子框架，揭示了多因子交互作用下的ESV空间分异机制，阐释了黄河流域ESV“格局稳定-阶段分异-机制转型”的演化路径。研究成果可为流域国土空间精准管控、生态安全格局优化及高质量发展构建提供科学依据与决策参考。后续研究可从服务功能结构解析与多尺度土地利用响应视角切入，深入探究建设用地扩张对ESV结构性演变的驱动效应，进一步丰富人地系统耦合机制的理论认知。

参考文献

1 Costanza R, Darge R, DegrooT R, et al. The value of the world’s ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387: 253-260.

2 Liu H L, Wang Z L, Zhang L P, et al. Construction of an ecological security network in the Fenhe River Basin and its temporal and spatial evolution characteristics[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 417: 137961.

3 Song F, Su F L, Mi C X, et al. Analysis of driving forces on wetland ecosystem services value change: A case in northeast China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 751: 141778.

4 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源科学, 2025, 37(9): 1740-1746.

5 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: 1243-1254.

6 白羽萍, 王佳斌, 刘恋, 等. 黑河流域生态系统服务价值预测及权衡分析——以张掖市为例[J]. 生态学报, 2022, 42(13): 5187-5199.

7 高星, 杨刘婉青, 李晨曦, 等. 模拟多情景下白洋淀流域土地利用变化及生态系统服务价值的空间响应[J]. 生态学报, 2021, 41(20): 7974-7988.

8 王若思, 潘洪义, 刘翊涵, 等. 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[J]. 生态学报, 2022, 42(01): 76-90.

9 张发, 玉素甫江•如素力, 艾尔肯•图尔逊. 基于土地利用的博斯腾湖流域生态系统服务价值时空变化[J]. 生态学报, 2021, 41(13): 5254-5265.

10 Brouwer R, Pinto R, Dugstad A, et al. The economic value of the Brazilian Amazon rainforest

ecosystem services: A meta-analysis of the Brazilian literature[J]. Plos One, 2022, 17: 268425.

11 Jenkins W A, Murray B C, Kramer, R A, et al. Valuing ecosystem services from wetlands restoration in the Mississippi Alluvial Valley[J]. Ecological Economics, 2010, 69: 1051-1061.

12 Qu H J, You C, Wang W Y, et al. Spatio-temporal interplay between ecosystem services and urbanization in the Yangtze River Economic Belt: A new perspective for considering the scarcity effect[J]. Land Use Policy, 2024, 147: 107358.

13 Liu Q, Qiao J, Li M, et al. Spatiotemporal heterogeneity of ecosystem service interactions and their drivers at different spatial scales in the Yellow River Basin[J]. Science of the Total Environment, 2024, 908: 168486.

14 Yang M, Gao X, Siddique K H M, et al. Spatiotemporal exploration of ecosystem service, urbanization, and their interactive coercing relationship in the Yellow River Basin over the past 40 years[J]. Science of the Total Environment, 2023, 858: 159757.

15 中华人民共和国中央人民政府 . 中共中央 国务院印发《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》[EB/OL]. [2021-10-08]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/08/content_5641438.htm.

16 Ding Y J, Zhang L F, He Y, et al. Spatiotemporal evolution of agricultural drought and its attribution under different climate zones and vegetation types in the Yellow River Basin of China[J]. Science of the Total Environment, 2024, 914: 169687.

17 Su K, Wei D Z, Lin W X. Evaluation of ecosystem services value and its implications for policy making in China - A case study of Fujian province[J]. Ecological Indicators, 2020, 108: 105752.

18 Xie L, Wang H, Liu S. The ecosystem service values simulation and driving force analysis based on land use/land cover: A case study in inland rivers in arid areas of the Aksu River Basin, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 138: 108828.

19 Li F, Zhang S, Yang J, et al. Effects of land use change on ecosystem services value in West Jilin since the reform and opening of China[J]. Ecosystem Services, 2018, 31: 12-20.

20 Lieht H, Whittaker R H. Primary productivity of the biosphere[M]. Springer-Verlag, 1975.

21 王劲峰, 徐成东 . 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72 (1):116-134.

22 Zhou Z X, Sun X R, Zhang X T, et al. Inter-regional ecological compensation in the Yellow River Basin based on the value of ecosystem services[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 322:116073.

23 Yu B W, Zang Y G, Wu C S, et al. Spatiotemporal dynamics of wetlands and their future multi-scenario simulation in the Yellow River Delta, China[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 353:120193.

24 Wang J, Zhou W, Guan Y J. Optimization of management by analyzing ecosystem service value variations in different watersheds in the Three-River Headwaters Basin[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 321: 115956.

25 Yang R J, Chen H, Chen S, et al. Spatiotemporal evolution and prediction of land use/land cover changes and ecosystem service variation in the Yellow River Basin, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 145:109579.

Spatiotemporal Evolution of Ecosystem Service Value in the Yellow River Basin of China: Factor Revision, Driving Forces, and Interactive Effects

HU Shiyu, LIU Dong*, SHI Xingyu, YANG Luyao

College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China

Abstract: The ecological conservation and high-quality development of the Yellow River Basin (YRB) is a major national strategy. Scientifically assessing its ecosystem service value (ESV) and driving mechanisms is a key prerequisite for achieving regional ecological protection and sustainable development. Existing studies predominantly rely on static or locally adjusted equivalent factors, making it difficult to capture the dynamic evolution of ESV in response to changes in ecosystem structure and socio-economic conditions. Moreover, there is a lack of quantitative analysis on the interactive driving mechanisms behind the spatial differentiation of ESV. To address this, this study establishes a dynamically adjusted ESV equivalent factor framework based on localized parameter calibration, conducting multi-period dynamic accounting of ESV in the YRB from 2000 to 2020. Combined with the geographical detector model, it identifies the dominant driving factors of ESV spatial differentiation and their interactive effects. The results show: ① From 2000 to 2020, the overall ESV of the YRB exhibited a fluctuating growth trend ("rise-decline-recovery") with an increase of 13.3%. The trends in the upper and middle reaches were generally consistent with the whole basin, while the lower reaches experienced continuous decline with an expanding rate, reflecting a regional differentiation pattern of "improvement in upper/middle reaches and degradation in lower reaches". ② The spatial distribution of ESV showed a pattern of "higher in the west and south, lower in the east and north." Hotspots (high-value clusters) significantly contracted, while cold spots (low-value clusters)

expanded, with a trend of “expansion in middle/lower reaches and contraction in upper reaches”. ③ Land use type was the primary driver of ESV spatial differentiation. The explanatory power of any two-factor interaction exceeded that of a single factor, demonstrating a two-factor enhancement effect and highlighting the synergistic driving mechanism of natural and socio-economic factors. ④ The interaction between land use and other factors was most prominent but showed a weakening trend, indicating that the spatial differentiation of ESV in the YRB is transitioning from “single strong-constraint driving” to “multi-objective comprehensive dominance”. By dynamically adjusting equivalent factors, this study clarifies the spatial differentiation patterns of ESV under multi-factor interactions and reveals the evolutionary process of ESV in the YRB as “stable pattern-stage differentiation-mechanism transition”. It provides a quantitative basis and decision-making reference for precise spatial governance, optimization of ecological security patterns, and the design of coordinated pathways for ecological conservation and high-quality development in the YRB.

Keywords: ecosystem service value; dynamic equivalence factors; spatiotemporal differentiation; interactive effects; Yellow River Basin