

DOI: 10.20103/j.stxb.202410082420

王奕淇, 胡荣炜, 甄雯青. 基于生态产品价值核算的黄河流域生态补偿分区研究. 生态学报, 2025, 45(11): - .

Wang Y Q, Hu R W, Zhen W Q. Study on ecological compensation zoning in the Yellow River Basin based on ecological product value accounting. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(11): - .

基于生态产品价值核算的黄河流域生态补偿分区研究

王奕淇, 胡荣炜*, 甄雯青

长安大学经济与管理学院, 西安 710064

摘要: 准确核算生态产品价值以及科学构建生态补偿分区方案, 对促进流域生态保护与经济社会发展的协同平衡、提升区域整体可持续发展能力具有重要意义。在核算 2002、2007、2012、2017 和 2022 年黄河流域 529 个县域生态产品价值的基础上, 探究生态产品价值的影响因素, 结合各县域的经济、生态足迹以及生态承载力水平, 利用 SOM-K-means 两阶段聚类算法对黄河流域生态补偿进行分区。研究发现: ①黄河流域年均降水量、植被归一化指数和高程等自然因素以及年末总人口、产业结构、夜间灯光等社会经济因素对黄河流域生态产品价值的影响具有明显的空间差异。②黄河流域上、中、下游的生态产品价值均呈现出上升态势, 供给、调节和文化服务价值也均有所提升, 其中供给服务增幅最大, 文化服务快速发展, 调节服务占最大贡献, 显示出生态保护与可持续发展的显著成效和区域差异。③黄河流域生态补偿分区符合流域基本生态功能要求, 支付区集中分布在经济较发达的下游和部分中游地区, 平衡区主要分布在经济发展水平和生态保护需求相对平衡的区域, 获补区则位于经济发展水平较低的上游地区以及中游的生态环境脆弱带。

关键词: 生态产品价值; 生态足迹; 生态补偿分区; 黄河流域

Study on ecological compensation zoning in the Yellow River Basin based on ecological product value accounting

WANG Yiqi, HU Rongwei*, ZHEN Wenqing

School of Economics and Management, Chang'an University, Xi'an 710064, China

Abstract: Accurately accounting for the value of ecological products and scientifically constructing ecological compensation zoning schemes is crucial for promoting the synergistic balance between watershed ecological protection and socio-economic development, as well as enhancing the overall sustainable development capacity of regions. Based on the valuation of ecological products in 529 counties of the Yellow River Basin for the years 2002, 2007, 2012, 2017, and 2022, this article explores the factors influencing the value of ecological products. By considering the economic development, ecological footprint, and ecological carrying capacity of each county, the study employs the two-stage clustering algorithm (SOM-K-means) to delineate the ecological compensation zones in the Yellow River Basin. The study finds: ① There are significant spatial differences in the influence of natural factors such as average annual precipitation, vegetation normalization index, and elevation, as well as socio-economic factors such as total population at the end of the year, industrial structure, and nighttime lighting on the value of ecological products in the Yellow River Basin. Among them, the impact of natural factors such as annual precipitation and elevation on the ecological product value is closely related to the geographical and climatic distribution, while socio-economic factors such as population and industrial structure are key to optimizing the supply of ecological product value through policy interventions in the future, promoting coordinated development between regional

基金项目: 国家社会科学基金项目 (23BTJ029); 陕西省社会科学基金项目 (2024ES12); 陕西省哲学社会科学研究专项一般项目 (2025YB0428)

收稿日期: 2024-10-08; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hrw991205@163.com

economy and ecology. ② The ecological product value in the upper, middle, and lower reaches of the Yellow River Basin has shown an upward trend, with increases in the values of supply, regulation, and cultural services. Among these, the supply services have seen the largest increase, cultural services have developed rapidly, and regulation services have contributed the most, demonstrating the significant effects of ecological protection and sustainable development, as well as regional disparities. ③ The ecological compensation zoning in the Yellow River Basin aligns with the basic ecological function requirements of the basin. The payment zones are mainly concentrated in the economically developed lower reaches and some middle reaches, the balancing zones are located in regions with relatively balanced economic development and ecological protection needs, and the receiving zones are found in the economically underdeveloped upper reaches and the ecologically fragile areas in the middle reaches. This study can promote the precision and differentiation of ecological compensation, optimize resource allocation, improve the efficiency of ecological compensation, and drive the continuous improvement of the ecological environment in the Yellow River Basin.

Key Words: ecological product value; ecological footprint; ecological compensation zoning; Yellow River Basin

习近平总书记在党的二十届三中全会上明确提出,中国式现代化是人与自然和谐共生的现代化,要完善落实绿水青山就是金山银山理念的体制机制。生态产品价值核算与生态补偿机制作为践行“两山”理念的关键举措,是促进生态产品价值实现的重要基础性工作。2021年4月,中共中央办公厅、国务院办公厅印发《关于建立健全生态产品价值实现机制的意见》,明确提出到2025年初步建立比较科学的生态产品价值核算体系,逐步完善生态保护补偿制度;探索构建特定地域单元生态产品价值评价体系,建立重点流域生态保护补偿机制时应考虑生态产品价值核算结果。2024年4月,国务院发布《生态保护补偿条例》,明确提出要拓展生态产品价值实现模式,促进生态保护主体利益得到有效补偿,为生态产品价值实现提供制度保障。黄河作为我国第二大河流,其流域生态保护和高质量发展事关中华民族伟大复兴的千秋大计,近年来不仅面临水资源短缺、生态脆弱等挑战,其干流和主要支流的生态补偿机制也有待完善^[1-2]。因此,准确核算生态产品价值、明确生态补偿分区,促进黄河流域实现永续发展,既是当前亟需解决的重大现实问题,也具有重要的理论研究价值。

生态产品是生态系统通过生态过程或与人类社会生产共同作用,为增进人类及自然可持续福祉提供的产品和服务^[3]。当前针对生态产品价值的研究主要聚焦于概念界定^[4]、实现路径^[5]和价值核算^[6]方面。学术界普遍认为生态产品价值是人类从生态系统获得的资源和服务的总和,包含基本生态产品保值和服务性生态产品增值两方面内涵^[7]。结合生态潜力和生态功能将生态产品的隐性价值显性化是践行生态产品价值实现机制的关键路径^[8]。基于此,科学核算生态产品价值能够为规范评估生态功能、完善生态保护补偿制度提供依据。既有研究主要采用当量因子法^[9]、“生态元”法^[10]和功能价值法^[11],从国家^[12]、省市级^[13]和流域^[14]层面对森林^[15]、水资源^[16]、耕地^[17]等生态要素的价值进行评估,为本文提供了丰富的理论工具和方法支持。

生态补偿是指通过经济或非经济手段,对生态保护主体予以激励性补偿的行为,旨在推动区域协同和公平^[18]。国内外学者总结提出坚持生态、经济、社会效益相统一的生态保护补偿机制,是推动生态文明建设的有效途径^[19-20]。因此,针对流域生态补偿的首要问题就是基于生态产品价值核算结果,对流域生态产品的供给方和受益方进行区分,并结合经济、社会发展情况精确识别补偿对象,确保补偿过程的有效性^[21]。已有研究选取如生态承载力盈亏及保有量目标完成情况^[22]、Meta分析法建立评价指标体系^[23]和SOM-K-means^[24]模型等方法对生态补偿对象进行甄别,划分生态补偿分区。确定生态补偿分区标准,客观准确地识别生态服务功能较高的潜在对象并进行优先补偿,是当前建立完善流域生态补偿机制的核心内容。

综上所述,已有研究主要聚焦于测度单一生态要素的生态产品价值,且鲜有学者将生态产品价值的核算结果应用于流域生态补偿分区。鉴于此,本文以黄河流域529个县域为研究对象,在系统核算各县域生态产品价值的基础上,结合各县域的经济、生态足迹以及生态承载力水平的典型特征,利用SOM-K-means两

阶段聚类算法对黄河流域生态补偿进行分区。本文可能的边际贡献在于:一是以县域为单位,更精确地把握不同地区的生态产品价值特点,有助于制定因地制宜的生态保护政策,推动生态保护与经济发展双赢。二是综合采用市场价值法、替代成本法等多种方法进行测算,提供全面的生态价值评估,支持科学的保护与补偿政策。三是将生态产品价值核算结果与经济发展、生态足迹、生态承载力水平相结合,采用 SOM-K-means 方法进行生态补偿分区,促进补偿的精准化与差异化,优化资源分配,提高生态补偿效率,推动黄河流域生态环境持续改善。

1 研究数据

1.1 研究区概况

黄河流域作为中华民族的母亲河,自青藏高原的巴颜喀拉山脉发源,形成了独特的“几”字形结构,依次流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南和山东九省份。流域上游位于青藏高原与内蒙古高原之间,地势高峻,水量充沛但含沙量较少,植被覆盖以高寒草甸、草原及少量森林为主,展现出高原特有的生态景观;中游流经黄土高原,地势起伏大,河流侵蚀作用强烈,形成了黄土沟壑地貌,水土流失问题严重;下游进入华北平原,地势平坦开阔,河流流速减缓,泥沙淤积形成“地上河”,同时农田广布,是人类活动最为密集的区域之一。考虑到黄河流域只流经四川省极少的区域,将除四川外的其余 8 省纳入研究样本,最终确定 529 个县域为研究对象。

1.2 数据来源

本文选取 2002—2022 年黄河流域 529 个县域的面板数据作为研究样本,根据黄河流域土地利用的实际情况,参考自然资源部 2023 年 11 月印发的《国土空间调查、规划、用途管制用地用海分类指南》以及中国科学院资源环境科学数据中心的土地利用数据集,将土地利用类型划分为六类,分别为耕地、林地、草地、水域、建设用地以及未利用地。土地利用数据来源于 Landsat 的年度中国土地覆盖数据集,DEM 数据取自地理空间数据云,空间分辨率均为 30m;蒸散发数据来源于 MODIS 全球蒸散发产品 (MODIS16),NPP 数据来自 MOD17A3HGH V6 遥感产品,空间分辨率均为 500m;降雨量数据来自资源环境数据云平台,空间分辨率为 1km。这些数据属于各类地理空间数据中具有较高空间分辨率和连续性的可靠数据集,能够精准提取县域层面的生态特征和生态格局分布。农林牧渔产值、各县域人口数据和污染物排放量等信息来自相应年份的统计年鉴。本文所有矢量数据采用统一坐标系进行投影,部分缺失数据采用插值法和趋势外推法进行填补。

2 研究方法

2.1 生态产品价值核算方法

参考 2022 年国家发展改革委和国家统计局联合印发的《生态产品总值核算规范》,根据生态系统的结构与特征,将黄河流域生态产品价值划分为供给服务、调节服务和文化服务三大类,共计 10 项指标。其中,供给服务是生态系统在一定时间内为人类提供且被使用的物质产品总价值。调节服务是生态系统通过自然过程调节环境条件,为人类提供间接惠益,包括土壤保持、水源涵养、洪水调蓄、空气净化、水质净化、碳固定、氧气提供和气候调节 8 项指标,供给及调节服务的各指标计算公式详见文献^[6]。文化服务是指自然景观提供的审美、教育和健康修养等非物质利益的生态景观价值,计算公式详见文献^[25]。

2.2 地理加权回归模型

参考程静等^[26]的研究,引入地理加权回归模型,通过将地理位置因素纳入分析,揭示影响因素在空间上的异质性规律,从而更准确地反映黄河流域各县域生态产品价值与其影响因素之间的空间关系,计算公式如下:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum \beta_j(u_i, v_i) x_{ij} + \varepsilon_i \quad (1)$$

式中, (u_i, v_i) 为研究区域 i 的坐标, $\beta_0(u_i, v_i)$ 为空间截距项, $\beta_j(u_i, v_i)$ 为连续函数 $\beta_j(u_i, v_i)$ 在位置 i 的值, x_{ij} 为

区域 i 中解释变量 x_j 的数值, j 为解释变量个数, ε_i 为随机扰动项。

2.3 生态补偿分区方法

2.3.1 生态补偿分区框架

生态补偿可有效激发生态保护内生动力, 为维持生态安全和生态系统服务功能提供长效机制。而确定补偿分区标准是建立生态补偿机制、促进区域协调持续发展的关键。参考赵政楠等^[27]的研究, 生态补偿分区中的支付区是经济发展水平较高、资源消耗和生态压力较大的地区, 通常需要承担生态补偿责任, 为生态环境较为脆弱的区域提供资金和技术支持; 平衡区是经济发展和生态保护水平相对平衡的地区, 生态供给与资源消耗基本处于平衡状态, 既不获得补偿也不需要支付; 获补区是生态产品价值供给较高但经济发展较低的地区, 对流域生态稳定起到重要作用, 需要获得补偿以避免因追求经济增长而牺牲环境的发展趋势。因此, 考虑到黄河流域的地域特性, 需在流域综合视角下, 统筹生态产品价值供给、经济发展水平、生态足迹和生态承载力, 对流域生态补偿分区进行划分, 以确保补偿机制的公平性、科学性和可持续性。

基于生态补偿遵循“谁开发、谁保护, 谁破坏、谁恢复, 谁受益、谁补偿, 谁污染、谁付费”的补偿主体和补偿范围确定原则, 生态产品价值供给直接关系到区域生态供给服务能力, 生态产品价值供给较高的地区是生态保护先行区, 开发利用强度受限, 通常是生态补偿的获补区^[28], 接受补偿能有效鼓励其维持生态功能, 预防生态退化, 生态产品价值供给用单位面积生态产品价值表示。经济发展水平反映了一个地区的生产力水平和资源利用效率, 经济较发达的地区资源开发和消耗压力较大, 产生的环境污染等负外部影响相对严重, 但具备较强的资金和技术优势, 需承担更多生态保护责任, 通常是生态补偿的支付区^[24]。作为补偿主体, 这些地区可通过提供技术支持和经济激励等促进欠发达地区的绿色转型和经济可持续发展。经济发展水平用人均国内生产总值表示。生态足迹和生态承载力能够有效评估区域生态压力和可持续发展潜力, 若生态足迹过高且承载力较低, 意味着当地资源消耗过剩, 通常是生态补偿的支付区^[22]。需向其他地区提供补偿, 以警示该地区资源枯竭和生态破坏行为, 并缓解产生的负外部性影响, 降低环境压力, 促进生态稳定。计算公式详见文献^[29]。

2.3.2 SOM-K-means 神经网络算法

在生态补偿分区的过程中, 选择合适的聚类算法至关重要。参考蔡鑫等^[24]的研究, 在采用孤立森林算法处理异常敏感样本的基础上, 引入 SOM-K-means 算法, 基于生态产品价值供给、经济发展水平、生态足迹和生态承载力四个维度进行聚类分析, 得到黄河流域生态补偿分区。这种算法采用轮廓系数评估聚类结果的紧密度和分离度, 轮廓系数越接近 1, 聚类质量越高, 生态补偿分区越准确^[30]。

3 结果与分析

3.1 黄河流域生态产品价值影响因素分析

研究生态产品价值时空演变及其影响因素, 对于深入理解生态环境变化、优化资源配置及推动区域可持续发展具有重要意义。因此, 为科学分析黄河流域生态产品价值时空演变特征, 本文参考 Zhang 等^[31]的研究, 从年均降水量、年末总人口、产业结构、植被归一化指数、高程以及夜间灯光数据这 6 种因素探讨黄河流域生态产品价值时空演变的驱动机制。

3.1.1 模型回归结果

将各主导因子与生态产品价值进行 OLS 线性回归, 拟合结果较为理想, 结果见表 1。

进一步对比 AICc 值、 R^2 和调整后 R^2 , 结果如表 2 所示。GWR 模型的估计结果相较于 OLS 模型更优, 说明 GWR 拟合结果更具合理性。

3.1.2 基于 GWR 的影响因子空间异质性分析

各影响因素回归系数的空间分布如图 1 所示, 可知年均降水量、植被归一化指数和高程作为重要的自然因素, 对黄河流域生态产品价值的影响具有空间分异特征。年均降水量增加将显著提升上游、降低中游地区

的生态产品价值,缘于上游如甘肃省的大部分县域,降水相对稀少,降水增加有助于改善土壤湿度、促进植被生长和生态系统恢复;而中游如陕西省的部分县域,过多的降水会导致水土流失、土壤侵蚀等负面影响。植被归一化指数的提升将显著增强中原地区、降低上游及呼包鄂榆地区县域的生态产品价值,缘于中原地区的植被覆盖面积增加有助于缓解土地退化和荒漠化问题;上游和呼包鄂榆地区植被覆盖度增加则可能会打破原有生态平衡,破坏生态环境质量。高程作为表征地形特征的重要指标,内蒙古对应县域的高程增加,代表生态系统更加脆弱敏感,生态产品价值降低;而陕西省的部分县域的高程增加,意味着生态气候条件和土壤环境更加适宜,有利于植被生长和生态系统的发展,对生态产品价值产生正面影响。

表 1 OLS 回归分析结果

Table 1 Results of OLS regression analysis

变量 Variable	系数 Coefficient	标准误 Standard error	<i>t</i> 值 <i>t</i> value	<i>P</i>	方差膨胀因子 VIF
截距 Intercept	191.3272	36.29398	5.27	0.000 ***	
年均降水 Average annual precipitation	0.236988	0.038748	6.12	0.000 ***	1.93
年末总人口 Total population at the end of the year	0.727583	0.172859	4.21	0.000 ***	1.50
产业结构 Industrial structure	-69.3469	33.20776	-2.09	0.037 **	1.09
植被归一化指数 Normalized difference vegetation index	-232.824	52.55837	-4.43	0.000 ***	2.38
夜间灯光数据 Nighttime lighting data	-1.0369	0.464544	-2.23	0.026 **	1.93
高程 Digital elevation model	0.035892	0.009755	3.68	0.000 ***	2.02

VIF: 方差膨胀因子 Variance inflation factor; ***, **, * 分别表示在 0.01、0.05、0.1 的水平上显著

表 2 OLS 与 GWR 模型对比

Table 2 Comparison of OLS and GWR models

模型 Model	AICc 值 AICc value	R^2	调整后 R^2 Adjusted R^2
最小二乘法 OLS	1430.986	0.148	0.139
地理加权回归 GWR	1221.151	0.572	0.505

AICc: 修正的赤池信息量准则 Akaike information criterion corrected; OLS: 最小二乘法 Ordinary least squares; GWR: 地理加权回归 Geographically weighted regression

年末总人口、产业结构以及夜间灯光数据作为重要的社会经济因素,对黄河流域生态产品价值的影响也具有空间异质特征。总体而言,年末总人口与黄河流域生态产品价值具有正相关关系,这种提升效果在中游地区尤为显著,而在上游及下游部分地区的影响则相对较小。产业结构优化升级有助于促进内蒙古自治区部分县域,阻碍宁夏回族自治区及陕西省部分县域的生态产品价值的提升。夜间灯光数据在甘肃省和内蒙古自治区部分县域对生态产品价值产生负面影响,这是因为这些地区的城市化进程更快,人类生产开发活动强度更高,生态系统更易受到破坏和退化;而陕西省部分县域,由于通过合理规划和科学管理实现了城市化与生态保护的协调发展,夜间灯光数据对生态产品价值产生正面影响。

3.2 黄河流域生态产品价值时空演化特征

3.2.1 时间演变特征

本文选取黄河流域 2002、2007、2012、2017 和 2022 年这 5 个特征年份,对黄河流域生态产品价值进行测度,结果如表 3 所示。总体来看,在供给服务方面,黄河流域的物质产品供应水平呈现出稳定增长的态势;在调节服务方面,黄河流域在调节气候变化、维护生态平衡方面的服务价值相对稳定,调节服务占比始终保持在较高水平;在文化服务方面,黄河流域文化服务价值呈现快速增长趋势,文化产业和旅游业发展迅速。

具体而言,在供给服务中,物质产品作为供给服务的重要组成部分,其价值在 2002—2022 年间呈现持续上升趋势,从 5454.42 亿元增长至 24974.61 亿元,涨幅高达 357.88%。同时,其占生态产品总价值的比例也从 10.59% 上升至 25.36%,反映出物质产品在黄河流域生态产品价值中的基础性和重要性不断增强。

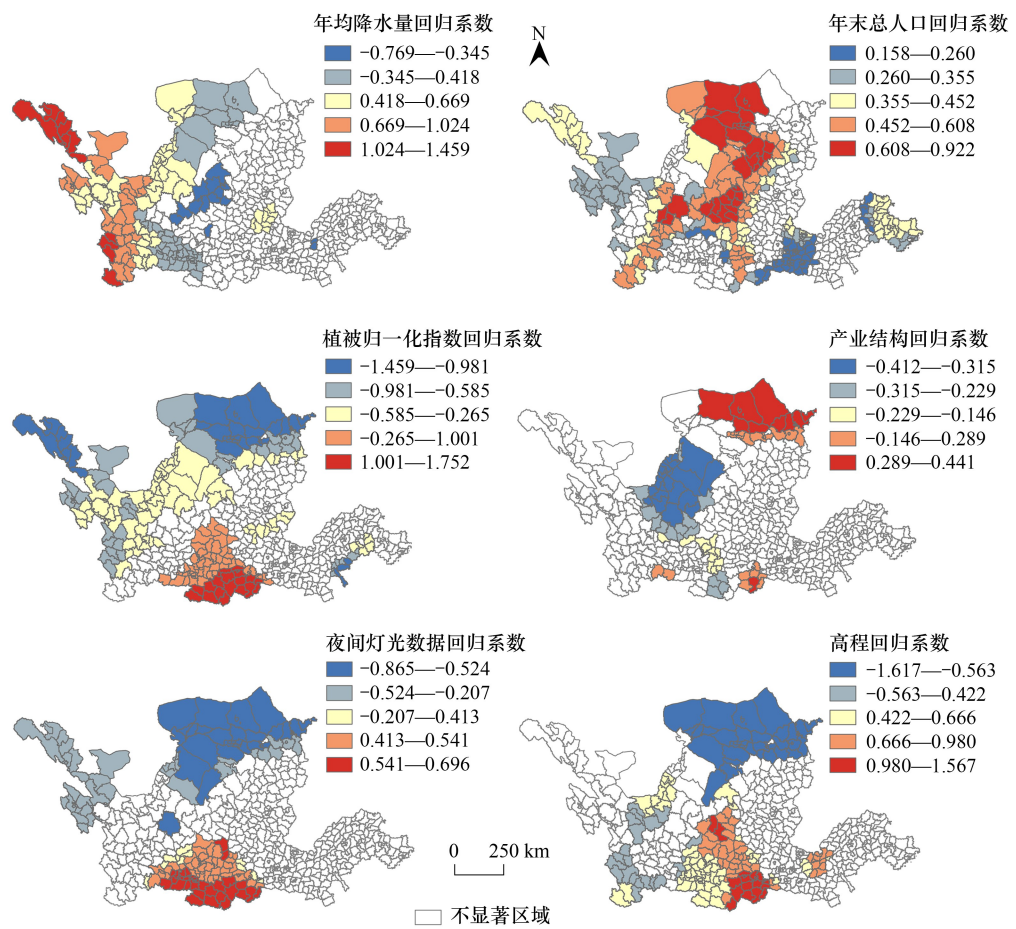


图1 黄河流域生态产品价值各影响因素的 GWR 空间回归系数

Fig.1 GWR spatial regression coefficients of individual factors influencing the value of ecological products in the Yellow River Basin

表 3 黄河流域生态产品价值时间演变特征

Table 3 Temporal evolution characteristics of ecological product value in the Yellow River Basin

一级服务 Primary services	二级服务 Secondary services	2002 年	2007 年	2012 年	2017 年	2022 年
供给服务 Supply services	物质产品	5454.42	8524.05	14125.13	17849.03	24974.61
	供给服务占比	10.59	14.22	19.99	20.62	25.36
调节服务 Regulatory services	土壤保持	9421.43	11980.82	10633.82	12483.21	9373.11
	水源涵养	768.25	896.60	985.58	993.13	984.16
	洪水调蓄	1364.95	1451.98	1484.43	1489.90	1543.15
	空气净化	560.91	561.46	561.40	558.97	557.67
	水质净化	24.66	30.19	31.73	31.85	34.13
	碳固定	2774.70	2928.20	3577.85	3433.85	3763.50
	氧气提供	1681.63	1774.65	2168.41	2081.13	2279.26
	气候调节	28638.41	29270.22	29906.13	30397.02	30516.31
	调节服务总值	45234.94	48894.10	49349.35	51469.06	49051.30
	调节服务占比	87.82	81.55	69.85	59.46	49.81
文化服务 Cultural services	生态景观	818.72	2535.81	7176.72	17239.18	24452.43
	文化服务占比	1.59	4.23	10.16	19.92	24.83
生态产品价值总值 Gross value of ecological products		51508.08	59953.96	70651.20	86557.27	98478.40

除供给服务占比、调节服务占比和文化服务占比的单位为%外,其余参数单位均为亿元

在调节服务中,土壤保持服务价值波动变化,2002 年为 9421.43 亿元,2012 年增至 10633.82 亿元,但 2022 年又降至 9373.11 亿元,这是受到黄河流域土地利用、农业生产方式转变及气候变化等因素的影响。水源涵养和洪水调蓄服务价值稳步增长,但增速相对较慢,占比保持在较低水平。空气净化总值由 2002 年的 560.91 亿元降至 2022 年的 557.67 亿元,缘于黄河流域城市化进程持续推进,工业活动不断增加,导致空气污染物排放量上升,对空气质量造成了压力。水质净化服务价值占比最少,缘于黄河流域流经的地区包括工业发达区和农业密集区,水体净化受到较大阻碍。碳固定服务价值在 2002—2022 年间总体呈现波动上升趋势,表明黄河流域在促进碳收支平衡、提升生态系统碳汇积累方面取得了一定成果。氧气提供的服务价值稳步增长,2002—2022 年增长了约 36%,反映了黄河流域生态环境的持续改善和生态系统的健康稳定。气候调节在调节服务中的占比最大,对维持生态平衡、调节生态环境具有重要作用,其服务价值从 2002—2022 年增长了 3.07%,说明流域生态系统具有较强的恢复能力和抗干扰能力,能够应对气候变化的挑战。

在文化服务中,生态景观作为文化服务的重要组成部分,不仅体现了自然景观的美学价值,还反映了人与自然和谐共生的发展理念。生态景观价值从 2002 年的 818.72 亿元增长至 2022 年的 24452.43 亿元,说明随着社会的进步和生活水平的提高,人民对生态景观的需求和重视程度不断增加。

3.2.2 空间演变特征

为分析黄河流域各县域生态产品价值的空间分布和变化趋势,采用自然间断点法对 2002、2007、2012、2017 和 2022 年 5 个特征年份的生态产品价值进行可视化(图 2)。图 2 显示,中上游地区是生态产品价值高值区,上游凭借生态环境、土地利用类型以及气候条件等生态优势稳定提升生态产品价值;中游的生态产品价

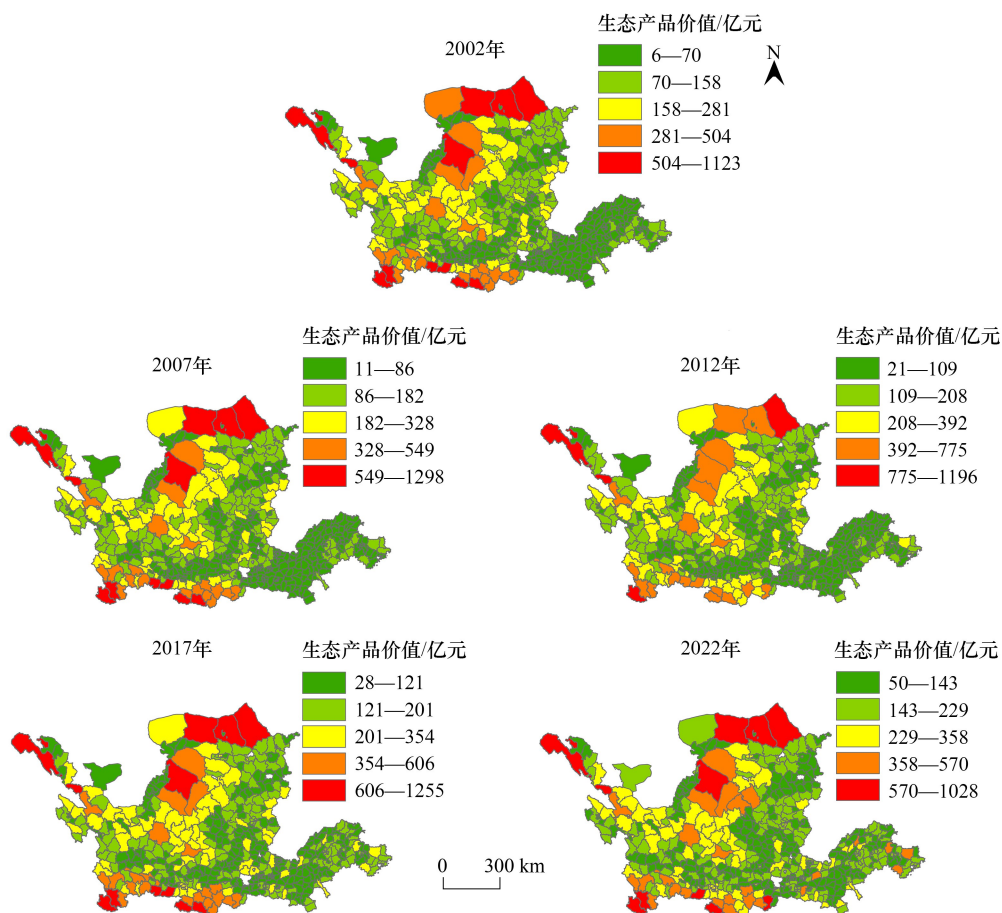


图2 黄河流域生态产品价值空间演变特征

Fig.2 Spatial evolution characteristics of ecological product value in the Yellow River Basin

值受到资源禀赋和人类活动的影响存在明显的区位差异,并在整体上较上游有所下降;下游是流域中城市化、工业化和农业集约化水平最高的地区,生态产品价值普遍较低。

结合 GWR 回归结果具体分析,黄河上游的生态产品价值最高,并在 2012 年后显著提升。主要得益于该地区降水充足、人口稀少、生态基础良好以及生态保护措施的实施,生态环境、水土保持能力和土地生产效率不断改善,生态产品价值得到提升。例如,合水县地处黄土高原、降水适中、林地丰富,生态产品价值从 2002 年的 251.02 亿元增长至 2022 年的 316.89 亿元,这是由于丰富的林草资源不仅稳定了生态功能,还促进了林下经济和生态旅游的发展。互助土族自治县地势南高北低、降水适宜、森林资源丰富,生态优势明显,生态产品价值在研究期内增长了 10.26%,这缘于当地政府通过落实生态修复措施,有效提高了生态系统服务功能,生态产品价值得到提升。

黄河流域中游的生态产品价值区域差异显著,整体呈现出先降低后增加的变化趋势。这缘于黄河中游跨度较大,宁夏沿黄城市群、呼包鄂榆和关中平原地区的生态产品价值受到降水量、产业结构等自然社会因素的影响强度与方向不同。同时,随着环境规制力度不断增加,发展模式由资源消耗向可持续发展格局演进,生态产品价值先降后升。例如,达尔罕茂明安联合旗地处草原地带,具有政府禁牧、休牧和划区轮牧等措施的切实保障,生态系统的稳定性和生态产品价值较高,2022 年的生态产品价值为 703.83 亿元。而繁峙县位于太行山北麓,土地利用类型为林地和草地,2022 年的生态产品价值仅有 207.20 亿元,这是由于其人类活动对生态环境的影响逐渐扩大,生态服务功能受到削弱,生态产品价值较低。

黄河流域下游的生态产品价值普遍较低,但增长迅速。这是由于该区域的重点开发区和优化开发区较多,初期经济发展较快,工业化和城市化进程较高,环境污染和生态破坏问题严重,近年随着环境保护措施的落实和产业绿色转型,生态产品价值得到提升。例如,安阳县地势平坦、水系发达,农业和林业资源丰富,2002 年的生态产品价值仅有 35.46 亿元,处于较低水平,这是由于该地发展进程较快,建设用地扩张对生态环境产生压力,生态产品价值相对较低。而城阳区依山傍海,资源丰富,生态产品价值从 2002 年的 36.64 亿元增长至 2022 年的 196.83 亿元,涨幅为 437.20%,这缘于该地注重绿色建筑和节能技术,近年在环境保护和绿色建筑方面取得显著成效,生态产品价值不断提升。

3.3 黄河流域生态补偿分区

基于黄河流域各县域的经济水平、生态产品价值供给、生态足迹和生态承载力四类指标,借助 MATLAB R2022a 聚类工具箱,采用 SOM-K-means 算法进行聚类分析,为黄河流域生态补偿划分支付区、平衡区和获补区(图 3)。

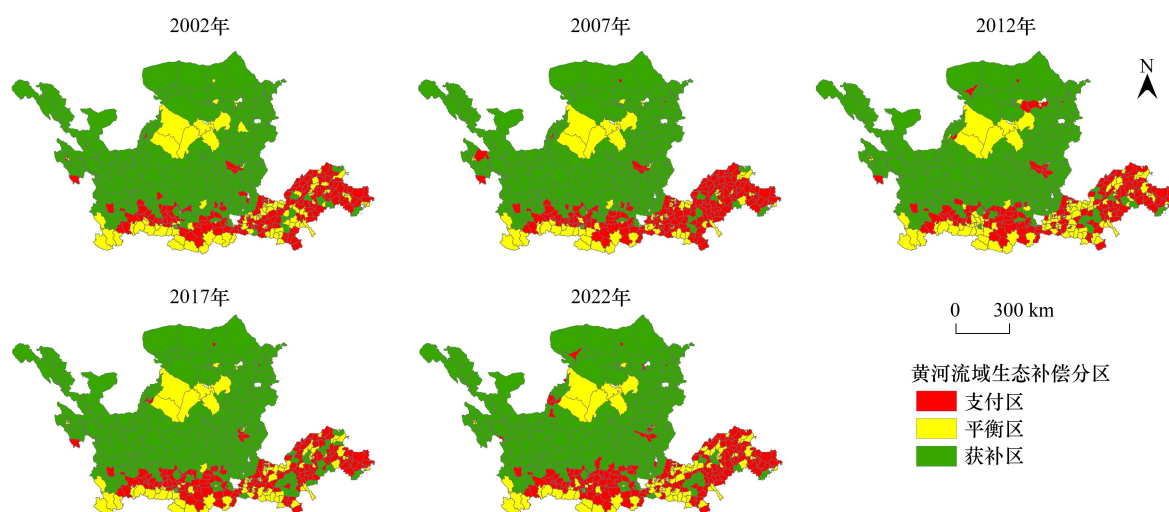


图 3 2002—2022 年黄河流域生态补偿分区

Fig.3 Ecological compensation zones in the Yellow River Basin from 2002 to 2022

由图 3 可知,2002—2022 年黄河流域支付区、平衡区和获补区的数量和分布均发生显著变化。支付区主要分布在中下游且数量不断增加,由 2002 年的 149 个增至 2022 年的 168 个。这是由于下游的山东、河南作为黄河流域经济发展的重要省份,在发展初期对资源的依赖程度较高,面临的环境压力较大,环境承载力较弱,2002 年的生态产品价值均值仅为上游的 1/4,是流域的主要支付区。中游陕西省部分县域随着经济和人口增长,消费需求上升,城市扩张导致生态足迹增加,既产生了水资源短缺、土壤污染等问题,也面临技术落后、生产效率低等发展问题,生态产品价值增长明显放缓,由 2002—2007 年的 13%降低至 2017—2022 年的 9%,生态压力增大。由此可见,这些作为黄河流域经济发达但产生严重负外部性影响的县域,应向生态保护主体县域支付生态补偿费用,以维持流域生态安全和协调公平。

平衡区主要零散分布在经济发展与生态环境相对平衡的区域,总体在研究期内有所减少,由 2002 年的 121 个减少至 2022 年的 116 个,其中下游增加,中游大幅减少。说明零散分布在下游济宁市、安阳市以及商洛市等地的平衡区,通过生态补偿、资源合理利用等行为,实现了社会经济增长与生态保护相协调的发展模式。如微山县 2022 年人均 GDP 为 58694.52 元,人均生态承载力和足迹分别为 0.41hm^2 和 4.61hm^2 ,生态产品价值也显著增加,这些指标均排名居中,说明该县域总体上既不用支付生态补偿费用,也不需要获得补偿。但也有玉泉区、栾川县等地从平衡区变为支付区,缘于这些地区的经济指标显著提高,如玉泉区人均 GDP 从 2002—2022 年增加了 17 倍,2022 年人均 GDP 排名第 21,但该县生态足迹扩大,超出其生态承载力,生态平衡被打破,在生态补偿机制中需承担更多的生态责任和经济付出。

获补区主要分布在黄河上游和部分中游县域,数量最多,但呈现逐渐减少的趋势。其中重点生态功能区的占比达到 41%,多位于上游,是由于上游受到自然条件的限制,经济发展相对滞后,生态产品价值最高,2022 年的均值为 207.09 亿元,对流域生态安全具有重要作用,通过获得生态补偿,可缓解其经济发展与生态保护之间的矛盾。中游在山西省的部分县域拥有丰富的自然资源,生态产品供给能力强,但受限于资源开发与管理,生态产品价值未能充分转化为经济收益,如广灵县在 2022 年人均 GDP 仅有 29211.83 元,排名靠后,成为获补区。而另外一些如古交市、红古区等县域在发展过程中资源消耗加剧,生态环境恶化,生态产品价值降低,如红古区 2022 年生态产品价值仅为 66.57 亿元,排名靠后,从获补区转变为支付区,这类县域需尽快转变发展方式,保障黄河流域的生态功能,提高生态产品供给,实现经济发展和环境保护协同共进。

4 结论与建议

本文以黄河流域 529 个县域为研究对象,在核算各县域生态产品价值、探究生态产品影响因素的基础上,结合各县域的经济发展、生态足迹及生态承载力水平,利用 SOM-K-means 两阶段聚类算法对黄河流域进行生态补偿分区。完善了参考黄河流域生态特征的补偿分区研究,为生态补偿政策的制定提供了新的视角和依据。研究发现:

(1) 黄河流域年均降水量、植被归一化指数和高程等自然因素以及年末总人口、产业结构、夜间灯光等社会经济因素对其生态产品价值的影响具有明显的空间分异特征。其中,年均降水量、高程等自然因素对生态产品价值的影响与地理气候分布密切相关;而人口、产业结构等社会经济因素则是未来通过政策干预对生态产品价值供给进行优化,推动区域经济和生态协调发展的重点所在。

(2) 黄河流域生态产品价值在研究期内呈现上升趋势。其中,调节服务占比最高,对流域生态产品价值具有最大贡献,供给服务和文化服务增长显著。上游的生态产品价值最高,且在 2012 年后迅速提升;中游的生态产品价值区域差异显著,整体呈现出先降低后增加的变化趋势;下游的生态产品价值普遍较低,但增长迅速。

(3) 基于生态产品价值供给、经济发展水平、生态足迹和生态承载力四个维度进行聚类得到的黄河流域生态补偿分区符合流域基本生态功能要求。其中,经济较发达、生态产品价值较低的下游和部分中游县域与生态补偿分区相对应,作为主要支付区数量不断增加;零散分布在黄河流域经济发展与生态环境相对平衡的

中游和下游县域,生态产品供给稳定,不用支付生态补偿费用,也不需要获得补偿,为平衡区的主要区域;黄河上游和部分中游生态产品价值较高的县域,既是流域生态保护的先行区,也是生态补偿的获补区,虽然数量最多,但逐年减少。

基于得到的研究结论,提出以下政策建议:

一是应继续加强上游地区生态资源的保护与合理利用,推动上中下游地区的生态补偿机制,减少下游和中游地区过度开发所带来的生态压力,促进流域内生态资源的协调和可持续发展。上游地区作为重要的生态产品供应源,需重视生态资源的保护,特别是水源地、森林和湿地,实施更加科学和系统的生态修复措施。同时,为避免下游和中游地区的过度开发加剧生态负担,应建立健全跨区域的生态补偿机制。通过生态补偿政策,合理调节上中下游地区的资源利用,推动流域内各区域的协同发展,确保流域生态资源的可持续利用,在提升生态产品整体价值的基础上平衡各区域在生态保护中的责任和收益。

二是应加大调节服务投资,通过科技创新和绿色产业推动资源合理利用,从而保障生态系统稳定性,促进供给服务的长期增值。一方面,要打破环境地域限制,通过人类活动合理开发利用生态资源,推动环境财富的可持续健康增长,创造提升整体生态产品价值的新发展契机。另一方面,支持生态产业和旅游业发展,提升文化服务的社会效益,实现生态价值最大化和经济增长的双赢,这既能提高生态产品的供给质量,也能推动地方经济绿色转型,形成生态和经济双向循环的良性格局。

三是应根据各县域生态补偿责任与需求,制定差异化政策,加强对获补区的资金支持与技术指导,避免获补区为促进经济发展而牺牲生态环境;明确平衡区的环保和排污责任,防止平衡区县域向支付区转变;加强对支付区补偿行为和资金流向的监督管理,确保各项补偿措施落实到位,通过这种精准的生态补偿政策,可以最大程度保障生态保护效果,避免地区间的生态资源开发失衡,确保生态产品价值的公平分配,进一步促进全流域的经济增长与环境保护双重可持续发展。

参考文献(References):

- [1] 杨晓娟,韩立新,吕超. 环境条件对黄河流域植被干旱状态的影响特征分析. 干旱区研究, 2024, 41(12): 2083-2093.
- [2] 王韧,王嘉睿,颜建军,贾云,郜晨,张秋泓. 基于遗传算法-PLUS模型的黄河流域景观生态脆弱性多情景模拟. 生态学报, 2025, 45(2): 567-585.
- [3] 于法稳,林珊,孙韩小雪. 共同富裕背景下生态产品价值实现的理论逻辑与推进策略. 中国农村经济, 2024(3): 126-141.
- [4] 欧阳志云,朱春全,杨广斌,徐卫华,郑华,张琰,肖懿. 生态系统生产总值核算:概念、核算方法与案例研究. 生态学报, 2013, 33(21): 6747-6761.
- [5] 李宇亮,伊然,王梓浩,王骏博,高宇,陈克亮. 生态产品价值实现理论研究的难点与对策. 生态学报, 2024, 44(19): 8914-8921.
- [6] 齐静,郭宇,黄大楠. 重庆市生态产品总值(GEP)核算与变化特征研究. 环境生态学, 2023, 5(9): 53-60.
- [7] Wang K F, Liu P, Sun F S, Wang S W, Zhang G, Zhang T P, Chen G D, Liu J Q, Wang G, Cao S K. Progress in realizing the value of ecological products in China and its practice in Shandong province. Sustainability, 2023, 15(12): 9480.
- [8] 孙玉环,张冬雪,梁雨菽,丁娇. 生态产品价值实现与城乡融合发展——基于城乡融合发展试验区的实证研究. 统计研究, 2024, 41(2): 87-99.
- [9] Ali A. Linking forest ecosystem processes, functions and services under integrative social-ecological research agenda: current knowledge and perspectives. Science of the Total Environment, 2023, 892: 164768.
- [10] Bashir M A, Qing L, Raza Syed Q, Barwińska-Małajowicz A, Hashmi S M. Resources policy from extraction to innovation: the interplay of minerals, geothermal energy, technological advancements, and ecological footprint in high-ecological footprint economies. Resources Policy, 2024, 95: 105182.
- [11] 朱锦维,刘成武,柯新利,黄利民,焦文轩. 城镇化过程中生态产品生产能力变化特征分析. 生态环境学报, 2024, 33(3): 469-477.
- [12] Zadehdabagh N, Monavari S M, Kargari N, Taghavi L, Pirasteh S. Sustainability of agroecosystems by indices: a comparative study between indicators of ecological footprint sustainability and emergy analysis; a case study in Dez Catchment, Iran. Ecological Modelling, 2022, 474: 110165.
- [13] 刘耕源,杨青,黄潇霄,刘畅,陈钰,张雯. 2000—2020年中国“两山”价值测算与动态分析. 北京师范大学学报:自然科学版, 2022, 58(2): 241-252.

- [14] 张捷, 湛莹, 石柳. 基于生态元核算的长江流域横向生态补偿机制及实施方案研究. 中国环境管理, 2020, 12(6): 110-119.
- [15] Narita D, Lemenih M, Shimoda Y, Ayana A N. Economic accounting of Ethiopian forests: a natural capital approach. Forest Policy and Economics, 2018, 97: 189-200.
- [16] 贾亦真, 沈菊琴, 王晗. 区域水资源资产确认、计量及报表编制. 自然资源学报, 2022, 37(12): 3297-3312.
- [17] Zhang R Q, Li P H, Xu L P, Zhong S, Wei H. An integrated accounting system of quantity, quality and value for assessing cultivated land resource assets: a case study in Xinjiang, China. Global Ecology and Conservation, 2022, 36: e02115.
- [18] 杜焱强, 王继应, 孙雪峰. “生态颜值”何以持续转化为“农民财富”? 中国人口·资源与环境, 2022, 32(10): 150-159.
- [19] 吴春生, 张鹏, 戴尔阜, 尹君. 基于生态系统服务的生态补偿政策制定探讨. 生态学报, 2023, 43(24): 10032-10041.
- [20] Sangha K K, Ahammad R, Russell-Smith J, Costanza R. Payments for ecosystem services opportunities for emerging nature-based solutions: integrating indigenous perspectives from Australia. Ecosystem Services, 2024, 66: 101600.
- [21] 李洁, 宋晓谕, 吴娜, 邓晓红, 胡想全, 孙栋元. 渭河流域甘肃段生态补偿成本测度与分区. 经济地理, 2018, 38(1): 180-186.
- [22] 党昱譔, 孔祥斌, 温良友, 张蚌蚌, 谢臻, 伦飞. 中国耕地生态保护补偿的省级差分分区及补偿标准. 农业工程学报, 2022, 38(6): 254-263.
- [23] Zhong J L, Li Z G, Zhang D, Yang J, Zhu J X. An evaluation framework for urban ecological compensation priority in China based on meta-analysis and fuzzy comprehensive evaluation. Ecological Indicators, 2024, 158: 111284.
- [24] 蔡鑫, 叶长盛, 肖蔚, 彭锦臣. 长江中游地区土地利用碳收支空间关联及碳补偿分区. 长江流域资源与环境, 2024, 33(7): 1474-1488.
- [25] 孔凡斌, 崔铭烨, 徐彩瑶, 陆雨, 沈月琴. 浙江省森林生态产品价值实现对城乡差距的影响. 林业科学, 2023, 59(1): 31-43.
- [26] 程静, 王鹏, 赵文智, 刘任涛. 黄河流域不同生态地理区草地生态系统脆弱性及其空间驱动因素. 生态学报, 2025, (05): 1-13.
- [27] 赵政楠, 茹少峰. 黄河流域生态补偿的时空格局、区域差异及分布动态演进. 环境科学, 2024, 45(10): 5853-5867.
- [28] 刘香华, 王秀明, 刘谓承, 张音波, 刘飘. 基于外溢生态系统服务价值的广东省生态补偿机制研究. 生态环境学报, 2022, 31(5): 1024-1031.
- [29] 官冬杰, 姜亚楠, 严聆云, 周健, 和秀娟, 殷博灵, 周李磊. 基于生态足迹视角的长江流域生态补偿额度测算. 生态学报, 2022, 42(20): 8169-8183.
- [30] 邹逸, 陈梓烽. 基于图深度学习和模糊聚类的深圳市通勤生活圈空间范围与内部结构研究. 地理研究, 2024, 43(9): 2392-2410.
- [31] Zhang H P, Liu S. Exploring the spatial-temporal patterns of urban ecosystem service relationships and their driving mechanisms: a case study of Wuhu City, China. Ecological Indicators, 2024, 167: 112726.