

# 山西省黄河流域生态绩效时空演变及提升路径

孙浩, 刘慧芳, 王瑾, 郭永龙

(山西农业大学 资源环境学院, 山西 太谷 030801)

**摘要:** [目的] 开展山西省黄河流域生态绩效评价, 为该区域可持续发展提供理论支撑与决策依据。[方法] 以山西省黄河流域为研究区, 基于“压力—状态—响应”模型构建理论框架, 运用 InVEST 模型, SFA 模型和耦合协调度等方法, 评价 2010—2020 年的生态绩效时空互动, 并依据生态绩效水平现状和空间分布特征, 自下而上开展生态绩效优化分区。[结果] ① 2010—2020 年, 山西省黄河流域生态系统服务综合指数提高 2.27%, 空间分布呈“南北纵列, 高低相间”, 形成以吕梁山和太岳山—中条山为主的双核心模式。② 2010—2020 年, 山西省黄河流域生态效率提高 43.48%, 空间分布呈“中部低, 四周高”。③ 2010—2020 年, 山西省黄河流域生态绩效提高 35.29%, 空间分布呈“中部低, 四周高”。④ 依据生态绩效空间分异特征, 将研究区划分为生态绩效重塑区、生态绩效改良区、生态绩效缓冲区、生态绩效提升区和生态绩效保育区, 分区分类提出针对性生态绩效提升路径。[结论] 山西省黄河流域生态绩效总体不高, 仍处于高质量发展初级阶段, 未来需要探寻适合该区域生态保护和经济发展高度协调的新路径与支撑点。

**关键词:** 生态绩效; InVEST 模型; SFA 模型; 耦合协调; 山西省黄河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)06-0339-14

中图分类号: X22, X826

**文献参数:** 孙浩, 刘慧芳, 王瑾, 等. 山西省黄河流域生态绩效时空演变及提升路径[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 339-352. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20241014.001; Sun Hao, Liu Huifang, Wang Jin, et al. Spatiotemporal evolution and improvement path of ecological performance in Yellow River basin of Shanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 339-352.

## Spatiotemporal Evolution and Improvement Path of Ecological Performance in Yellow River Basin of Shanxi Province

Sun Hao, Liu Huifang, Wang Jin, Guo Yonglong

(College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China)

**Abstract:** [Objective] The ecological performance of the Yellow River basin in Shanxi Province was evaluated to provide theoretical support and a decision-making basis for sustainable development of the region. [Methods] Using the Yellow River basin in Shanxi Province as the research area, a theoretical framework was constructed based on the “pressure-state-response” model, and the spatial-temporal interaction of ecological performance from 2010 to 2020 was evaluated using InVEST, SFA, and the coupling coordination degree. According to the current situation and spatial distribution characteristics of the ecological performance level, ecological performance optimization zoning was conducted from bottom to top. [Results] ① From 2010 to 2020, the ecosystem services index of the Yellow River basin in Shanxi Province increased by 2.27%, and the spatial distribution was “north-south, high and low,” forming a double-core pattern mainly in the Lüliang Mountains and Taiyue-Zhongtiao Mountains. ② From 2010 to 2020, the ecological efficiency of the Yellow River basin in Shanxi Province increased by 43.48%, and the spatial distribution was “lower in the center and higher in the periphery.” ③ From 2010 to 2020, the ecological performance of the Yellow River basin in Shanxi Province increased by 35.29%, with a spatial distribution of “lower in the center and higher in the periphery.” ④ Based on the characteristics of spatial differentiation of ecological performance, the study area was divided into ecological performance remodeling, ecological performance

收稿日期: 2024-06-29

修回日期: 2024-08-28

资助项目: 山西省哲学社会科学规划课题“山西县域城乡融合赋能乡村振兴的作用机制与实现路径研究”(2023YJ036)

第一作者: 孙浩(1999—), 女(汉族), 山西省阳泉市人, 硕士研究生, 研究方向为土地资源管理。Email: sunhaok35@163.com。

通信作者: 刘慧芳(1982—), 女(汉族), 山西省长治市人, 副教授, 主要从事土地可持续利用方面的研究。Email: liuhuifang0354@sxau.edu.cn。

improvement, ecological performance buffer, ecological performance enhancement, and ecological performance conservation areas, and the targeted ecological performance improvement paths were proposed. [Conclusion] The ecological performance of the Yellow River basin in Shanxi Province is generally poor and is still in the primary stage of high-quality development. In future, it will be necessary to explore new paths and support points suitable for a high degree of coordination between ecological protection and economic development in the region.

**Keywords:** ecological performance; integrated valuation of ecosystem services and trade-offs model (InVEST model); stochastic frontier approach model (SFA model); coupling coordination; Yellow River basin in Shanxi Province

已有研究对生态绩效进行了诸多探索,从评价体系来看,国外建立评价体系的的原则大致相同,均是从维护生态系统健康的角度出发进行生态绩效指标的构建<sup>[1-2]</sup>,国内多基于投入产出视角,采用分级指标体系来测算<sup>[3-4]</sup>;从应用实践来说,国外主要通过评价生态绩效对城市形态和城市土地利用结构进行优化策略研究、景观设计和港口规划等<sup>[5-7]</sup>,而中国学者对于不同领域生态绩效的实践进行了研究,包括企业经济、农业经济和城乡规划等领域<sup>[8-11]</sup>;从研究方法来说,多采用数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)测度<sup>[12-13]</sup>。从概念来看,已往学者多基于投入产出视角对生态绩效概念展开探索<sup>[8,10,14-15]</sup>。但是,此内涵忽略了实现生态目标的效果对当地生态的贡献。而从高质量发展理念出发,兼顾生态保护,协同创新、协调、绿色、开放、共享五大理念<sup>[16]</sup>,探索一定生态约束下的最优经济和福利产出,已经成为可持续发展研究的热点问题。

山西省黄河流域是全国重要的能源基地、华北地区重要生态安全屏障、中国水土保持功能区,也是中华文明重要发祥地之一,在流域高质量发展中占据重要地位。在“黄河流域生态保护和高质量发展”国家战略引领下,该区域正在成为中国未来发展的重点区域之一<sup>[17]</sup>。但是,目前山西省黄河流域发展和保护的矛盾突出,面临着土地利用转型,煤炭资源可持续开采,水土流失同步治理和生态环境高质量保护与建设等关键问题<sup>[18]</sup>。在此背景下,系统性评估生态绩效对该地的可持续发展尤为重要。为此,本文以 2010,2015 和 2020 年为时间尺度,基于 InVEST 模型(integrated valuation of ecosystem services and trade-offs model)和 SFA 模型(stochastic frontier approach model),运用耦合协调度模型关联“生态系统服务+生态效率”,评价生态绩效分布状况,并分类施策,旨在为山西省黄河流域可持续发展提供科学依据。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 研究区概况

黄河流域山西省段(图 1)位于黄河流域中游,地

处黄土高原东部,范围为  $110^{\circ}14'22''-113^{\circ}32'44''E$ ,  $34^{\circ}35'40''-40^{\circ}41'37''N$ ,气候属温带大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,四季分明。省内黄河干支流涉及区域共 11 个地级市,86 个县(市、区),国土面积  $1.15 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,占山西省全省面积的 73.10%,覆盖人口超过  $2.50 \times 10^7$ ,占全省 73.5%,地区生产总值超过  $1.90 \times 10^{12}$  元,占全省 75.9%。地势起伏大,西部为吕梁山,贯穿研究区南北,东南部为太岳山与中条山,中部有 3 个盆地,从北向南依次为:太原盆地、临汾盆地、运城盆地,形成了“三山夹三盆”的地势特点;汾河流经中部盆地,全长 713 km,流域面积  $3.97 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,以东为黄河的另一条重要支流(沁河)。黄河流域山西省段极易发生黄土崩塌、滑坡和泥石流等地质灾害,同时又是黄河流域经济较落后的地区之一。近年来该地由于经济产出大,又面临着生态环境脆弱和结构性矛盾等问题,因此成为整个黄河流域段乃至全国的重点建设区域。

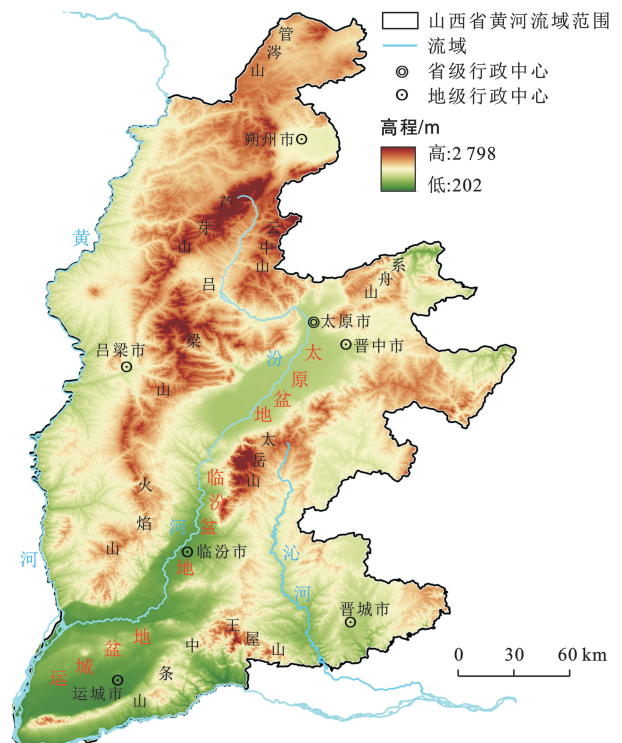


图 1 山西省黄河流域地形图

Fig.1 Topographic map of Yellow River basin in Shanxi Province

## 1.2 数据来源

土地利用数据、植被数据、夜间灯光数据、中国行政区划边界、黄河流域范围和流域分布来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>); 蒸散数据、土壤数据和气象数据分别来自国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>)、世界土壤数据库(HWSD)和中国气象数据网站(<https://data.cma.cn/>); DEM数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>), 分辨率为90 m; 社会经济统计数据来源于《山西省统计年鉴》(2010, 2015和2020年), NPP数据来自GEE云平台的MOD17A3HGF数据产品。

## 1.3 概念解读与理论框架

**1.3.1 概念解读** 生态绩效一词由美国景观规划师Ferguson在20世纪80年代提出, 自此生态绩效概念开始被风景园林、城乡规划和资源管理等学科探索, 内涵通常包括生态效率与生态系统健康等常见概念, 可理解为通过较少的资源投入, 获得最大的经济收益, 同时最大程度地降低对生态环境的破坏<sup>[19]</sup>; 也可以理解为生物在一定环境下生存和发展状态的效果体现<sup>[20]</sup>。近年来因国家重点强调生态环境保护与经济高质量发展双赢的思想, 不同领域的学者开始基于“生态视角”对研究内容展开绩效评估。

基于上述认知, 本文认为生态绩效一词可以解读为“生态”与“绩效”(效果和效率)的综合产物。其中, “效果”侧重目标的结果, 反映条件与效用; “效率”侧重目标的完成效率, 反映投入与产出比。在研究中, 以“生态系统服务”表示生态绩效的第一层含义(生态效果), 以“生态效率”表示生态绩效的第二层含义(生态效率), 最后运用耦合模型关联形成“生态系统服务+生态效率”评价方法, 构成生态绩效评价体系。所以, 生态绩效进一步阐释为: 通过评价生态经济系统呈现出的生态发展效果和投入产出效率, 衡量生态保护与经济发展的耦合协调水平。其中, 既包括生态文明理念所强调的生态系统健康发展以促进人与自然和谐相处, 也蕴含了新发展理念下追求资源高效利用以促进社会经济高效运行。

**1.3.2 理论框架** 高质量发展的核心即把握好生态保护和经济发展的辩证统一关系, 探究生态保护与经济发展协调发展的路径是山西省黄河流域高质量发展的关键前提。为了满足生产建设, 人类便开始不断地损害自然环境以求盈利能力不断提升, 而经济压力也反噬着生态健康。从生态压力来看, 山西省黄河流

域面临着水土流失治理难、资源开发强度大与环境污染范围广等压力, 对生态系统造成了不可避免地干扰和破坏。山西省是全国水土流失治理的“主战场”, 还是中国最大的产煤和供煤基地之一。据不完全估算, 此省煤炭资源还可以开采200 a左右<sup>①</sup>, 且以公路为主的运输结构导致大气环境问题凸显, 这些环境问题严重威胁着山西省人民的身体健康和生存环境; 从经济压力方面来说, 较突出的有技术创新薄弱、人地矛盾严重和产业转型困难三方压力, 这不仅使经济萎靡, 还会波及生态目标的完成效率。此区域长期以来过度依赖煤炭资源, 形成了“一煤独大”的经济结构, 整体研发投入水平较低, 导致能源科技创新能力不强, 所以转型困难, 且人均土地面积不足 $0.005 \text{ hm}^2$ <sup>②</sup>, 发展严重受阻。

基于上述, 为识别和诊断山西省黄河流域高质量发展区域布局, 本文构建起集生态发展效果和投入产出效率为一体的生态绩效测评体系, 以此科学认知生态系统的本底条件, 定量测度生态资源环境承载能力; 进而制定发展路径和策略来响应压力并影响目前状态, 以降低和补救由压力造成的环境破坏与损失, 最终构成了“压力—状态—响应”的循环关系(图2)。针对山西省黄河流域生态绩效时空格局, 揭示生态保护与经济发展的互馈机制, 提出面向山西省黄河流域高质量发展的生态保护与发展策略和建议, 也为中国构建生态绩效测评体系提供一种新思路。

## 1.4 研究方法

**1.4.1 生态系统服务评估** 近年来, 涌现了一大批学者基于生态系统服务评价某区域的生态环境质量<sup>[21-22]</sup>。依据联合国千年生态系统评估(millennium ecosystem assessment, MA)将生态系统服务分为供给、调节、支持和文化服务4类。本文考虑数据可获得性和适配性, 选取了7个服务功能共同构成生态系统服务评价指标体系。其中, 支持服务选取土壤保持和生境质量; 调节服务选取水源涵养和固碳调节; 供给服务选取粮食产量和植被供给(NPP); 文化服务选取美学景观。本研究运用InVEST等生态模型, 结合GIS评价研究区生态系统服务体系(表1), 并依据熵权法对指标进行加权归一, 最终得到生态系统服务综合指数。

**1.4.2 生态效率测算** 生态效率是指为达到一定的经济和环境目标而对生态资源的利用效率, 它是产出与投入的比值。生态效率是测定投入产出是否合理的应用型指标, 其强调在环境保护和经济发展之间寻找平衡点。

注: ①山西省煤炭保有资源储量来自山西省统计局《省情概貌》, 煤炭开采量来自山西省统计局《山西省2023年国民经济和社会发展统计公报》; ②土地面积来自山西省统计局《省情概貌》, 人口数来自山西省统计局《山西省2023年统计年鉴》。

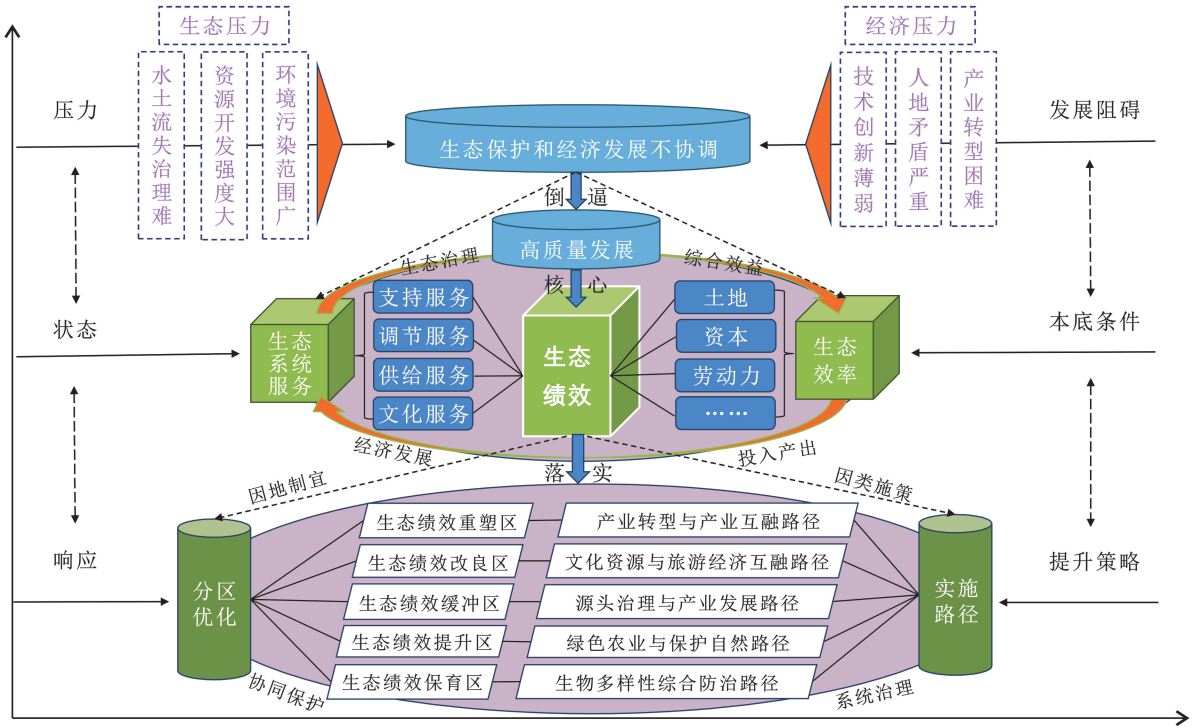


图 2 基于“压力—状态—响应”模型的生态绩效理论框架

Fig.2 Ecological performance theoretical framework based on “pressure-state-response” model

表 1 山西省黄河流域生态系统服务评价体系

Table 1 Evaluation system of ecosystem services in Yellow River basin of Shanxi Province

生态系统服务	子服务	模型与数据	意义
支持服务	土壤保持	$SE_p = R \times K \times LS, SE_a = R \times K \times LS \times C \times P, SC = SE_p - SE_a$ 。式中: SC 表示土壤保持量 $[t/(hm^2 \cdot a)]$ ; $SE_p$ 表示潜在的土壤侵蚀量 $[t/(hm^2 \cdot a)]$ ; $SE_a$ 为实际的土壤侵蚀量 $[t/(hm^2 \cdot a)]$ ; $R$ 为降雨侵蚀力因子 $[MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)]$ ; $K$ 为土壤可蚀性因子 $[t/(hm^2 \cdot h \cdot MJ \cdot mm \cdot hm^2)]$ ; $LS, C, P$ 分别为地形因子、植被覆盖与管理因子、水土保持措施因子	既衡量生态系统的土壤保持潜力,水土保持工作成效高低;又是区域内土壤形成、植被固着和水源涵养等生态过程的基础
	生境质量	$HQ_{xj} = H_j \left[ 1 - \left( \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K^z} \right) \right]$ 。式中: $HQ_{xj}$ 为土地利用 $j$ 中栅格 $x$ 生境质量指数; $H_j$ 为生境类型 $j$ 的生境适宜度,取值范围 0-1; $k$ 为半饱和常数,一般为生境退化度最大值的 1/2; $z$ 为常量,通常设为 2.5 <sup>[17]</sup>	明晰生态质量和生物多样性,对生境保护具有重要意义
调节服务	水源涵养	$Y_{ix} = (1 - \frac{AET_{ix}}{P_i}) \times P_i$ 。式中: $Y_{ix}$ 表示栅格 $i$ 中 $x$ 类土地利用类型的水源涵养量(mm); $P_i$ 为栅格 $i$ 的年均降水量(mm); $AET_{ix}$ 为栅格 $i$ 中 $x$ 类土地利用类型的年均蒸散量(mm)	识别水源保持在系统内部的能力,在调节区域水分循环、调节气候等方面具有重要作用
	固碳调节	$CS = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead}$ 。式中: $C_{above}$ 为地上部分碳储量 $(t/hm^2)$ ; $C_{below}$ 为地下部分碳储量 $(t/hm^2)$ ; $C_{soil}$ 为土壤碳储量 $(t/hm^2)$ ; $C_{dead}$ 为死亡有机碳储量 $(t/hm^2)$	影响流域小气候并指示人类活动,是判断生态系统服务优良与否的重要指标
供给服务	粮食产量	$CP_i = CP_{sum} \times \frac{NDVI_i}{NDVI_{sum}}$ 。式中: $CP_i$ 为耕地栅格 $i$ 的粮食产量 $(t/hm^2)$ ; $CP_{sum}$ 为县域粮食产量 $(t/hm^2)$ ; $NDVI_i$ 为耕地栅格 $i$ 的 NDVI 值; $NDVI_{sum}$ 为县域 NDVI 总值	关乎国计民生,对维护粮食安全和社会发展起到了重要的作用
	植被供给	NPP 数据集	表示供植物的生长和繁殖所需能量,也可以是供生态系统中其他生物利用的能量
文化服务	美学景观	$LA = \sum_{i=1}^n (F_i \times A_i)$ 。式中: $LA$ 为美学景观系数; $F_i$ 为第 $i$ 类生态系统的美学景观价值当量 $(km^{-2})$ ; $A_i$ 为第 $i$ 类生态系统面积 $(km^2)$	体现区域内社会文化与美学的感知

为科学合理的测算山西省黄河流域的生态效率,综合考虑传统的投入产出体系、数据的可获得性和地方实际情况,选取造林面积、固定资产投资、总人口、植被覆盖指数和夜间灯光数据为投入指标<sup>[24-25]</sup>。产

出指标在选取期望产出的基础上,考虑到没有加入非期望产出时结果测算值虚高和山西省能源燃耗较多等区域自然问题,故加入非期望产出(本文选取碳排放指标)来权衡生态效率,并构建指标体系(表 2)。

表 2 山西省黄河流域生态效率评价指标体系  
Table 2 Ecological efficiency evaluation index system in Yellow River basin of Shanxi Province

类型	一级指标	二级指标	符号	单位
投入指标	土地	造林面积	K	hm <sup>2</sup>
	资本	固定资产投资	D	10 <sup>4</sup> 元
	劳动力	总人口	W	10 <sup>4</sup> 人
	绿化	植被覆盖指数	G	—
	能源	夜间灯光指数	N	—
产出指标	期望产出	国内生产总值	Y	10 <sup>4</sup> 元
	非期望产出	碳排放	Z	kg/hm <sup>2</sup>

根据已有研究,SFA(stochastic frontier analysis)模型较传统的数据包络分析,最大的优点是考虑了误差

项,在误差和统计干扰处理方面具有优势。并且,SFA 模型中的超越对数函数,不受替代弹性不变假设的约束<sup>[26]</sup>,增加了二次的项数,有利于捕捉投入要素的时空变化特性,兼顾了资本和劳动相互作用对于产出的影响。所以本文运用超越对数函数测算山西省黄河流域 86 个县域生态效率。生态效率估计模型公式为<sup>[27-28]</sup>：

$$\ln Y_{it} = \ln f(X_{it}, \beta) + V_{it} - U_{it} \quad (1)$$

式中:Y<sub>it</sub>表示第 i 个县在第 t 个时间段内的实际产出量;ln f(X<sub>it</sub>, β)表示随机前沿函数,是现有技术水平条件下可能达到的最大产出;X<sub>it</sub>表示第 i 个省在第 t 时间段内的不同生产要素的投入;β 表示待估参数,V<sub>it</sub>为随机误差项,主要包含一些不可控因素及统计误差的影响,服从正态分布 N~(0,σ<sub>v</sub><sup>2</sup>);U<sub>it</sub>为技术无效率率项,服从截断正态分布 N~(m<sub>it</sub>,σ<sub>u</sub><sup>2</sup>),m<sub>it</sub>代表技术损失函数,m<sub>it</sub>越大,技术效率越低;且与 V<sub>it</sub>和 U<sub>it</sub>相互独立。

$$\begin{aligned} \ln Y_{it} = & \beta_0 + \beta_1 \ln K_{it} + \beta_2 \ln D_{it} + \beta_3 \ln W_{it} + \beta_4 \ln G_{it} + \beta_5 \ln N_{it} + \frac{1}{2} \beta_6 (\ln K_{it})^2 + \frac{1}{2} \beta_7 (\ln D_{it})^2 + \\ & \frac{1}{2} \beta_8 (\ln W_{it})^2 + \frac{1}{2} \beta_9 (\ln G_{it})^2 + \frac{1}{2} \beta_{10} (\ln N_{it})^2 + \beta_{11} \ln K_{it} \ln D_{it} + \beta_{12} \ln K_{it} \ln W_{it} + \\ & \beta_{13} \ln K_{it} \ln G_{it} + \beta_{14} \ln K_{it} \ln N_{it} + \beta_{15} \ln D_{it} \ln W_{it} + \beta_{16} \ln D_{it} \ln G_{it} + \beta_{17} \ln D_{it} \ln N_{it} + \\ & \beta_{18} \ln W_{it} \ln G_{it} + \beta_{19} \ln W_{it} \ln N_{it} + \beta_{20} \ln G_{it} \ln N_{it} + V_{it} - U_{it} \end{aligned} \quad (2)$$

式中:K<sub>it</sub>为 i 县在 t 年的造林面积;D<sub>it</sub>为 i 县在 t 年的固定资产投资;W<sub>it</sub>为 i 县在 t 年的总人口;G<sub>it</sub>为 i 县植被覆盖指数的平均值;N<sub>it</sub>为 i 县夜间灯光指数的平均值;β<sub>0</sub>—β<sub>20</sub>为未知待估系数,若其为正数,则表明因子对研究区生态效率有正向影响;反之,为负面影响。

### 1.4.3 生态绩效评价

(1) 相关性分析。采用 Pearson 方法分析各变量之间的相互影响和作用关系。相关系数(r)在-1和 1 之间,r 为 1 意味两者可以很好地由直线方程来描述,r 为-1 意味着所有的数据点都落在直线上,r 为 0 意味着两个变量之间没有线性关系,当 r>0 时表示正相关,认为两者之间是协同关系,反之,为权衡关系<sup>[26]</sup>。计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中:x<sub>i</sub>和 y<sub>i</sub>分别表示变量 x 和 y 在 i 点的观测值;̄x 和 ̄y 分别表示自变量 x 和因变量 y 的平均值。

Pearson 相关性能检验单个自变量与单个因变量之间的相关性,但是不能解决两个不相似矩阵(系统)之间的相关性问题。所以将 Pearson 相关性和

Mantel test 检验方法相结合,基于 R 语言操作平台中的 ggcor 等数据包计算、运用可视化平台绘图,在分析各影响因子间的相关性基础之上,进一步探究生态系统服务和生态效率两大系统对土壤保持、水源涵养和造林面积等 12 个因子的响应程度,剖析两大系统耦合关系的内在机制。

(2) 耦合协调分析。运用耦合协调度模型,形成“生态系统服务+生态效率”耦合协调机制,评价两者的耦合协调关系。具体计算公式为<sup>[29]</sup>：

$$C = \sqrt{[1 - (U_2 - U_1)] \times \frac{U_1}{U_2}} \quad (4)$$

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2 \quad (5)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (6)$$

式中:C 为生态系统服务与生态效率的耦合度,且 C ∈ [0,1]。当 C=1 时,耦合度最大,生态效率与生态系统服务达到高度协调,表明两个系统趋于有序发展;C=0 时,两个系统趋于无序发展。U<sub>1</sub>和 U<sub>2</sub>分别代表生态系统服务与生态效率;T 为综合评价指数,α 和 β 为等权重值;D 为生态系统服务与生态效率的耦合协调度。将耦合协调度(D)划分为 5 种类型:低绩效[0.0,0.2),中低绩效[0.2,0.4),一般绩[0.4,0.6),中高绩效[0.6,0.8)和高绩效[0.8,1.0]。

## 2 结果与分析

### 2.1 生态系统服务综合评价

2.1.1 生态系统子服务时空演变 基于 InVEST 模型与 GIS 可视化板块,得到生态系统子服务均值(表 3)和子服务时空变化(图 3—9)。从均值变化来看,土壤保持、生境质量和粮食产量平均值呈下降趋势,下降率分别为 $-14.75\%$ 、 $-4.35\%$ 和 $-5.56\%$ ,其余子服务均值都呈上升趋势,其中,植被供给的上升率最高,为 $27.78\%$ ,固碳调节的上升率最低,为 $4.92\%$ 。

表 3 2010—2020 年山西省黄河流域生态系统子服务均值  
Table 3 Mean values of ecosystem sub services from 2010 to 2020 in Yellow River basin of Shanxi Province

生态系统子服务	子服务均值			
	2010 年	2015 年	2020 年	变化率/%
土壤保持	0.61	0.59	0.52	-14.75
生境质量	0.69	0.69	0.66	-4.35
水源涵养	0.41	0.36	0.46	12.20
固碳调节	0.61	0.61	0.64	4.92
粮食产量	0.36	0.38	0.34	-5.56
植被供给	0.54	0.53	0.69	27.78
美学景观	0.48	0.47	0.49	2.08

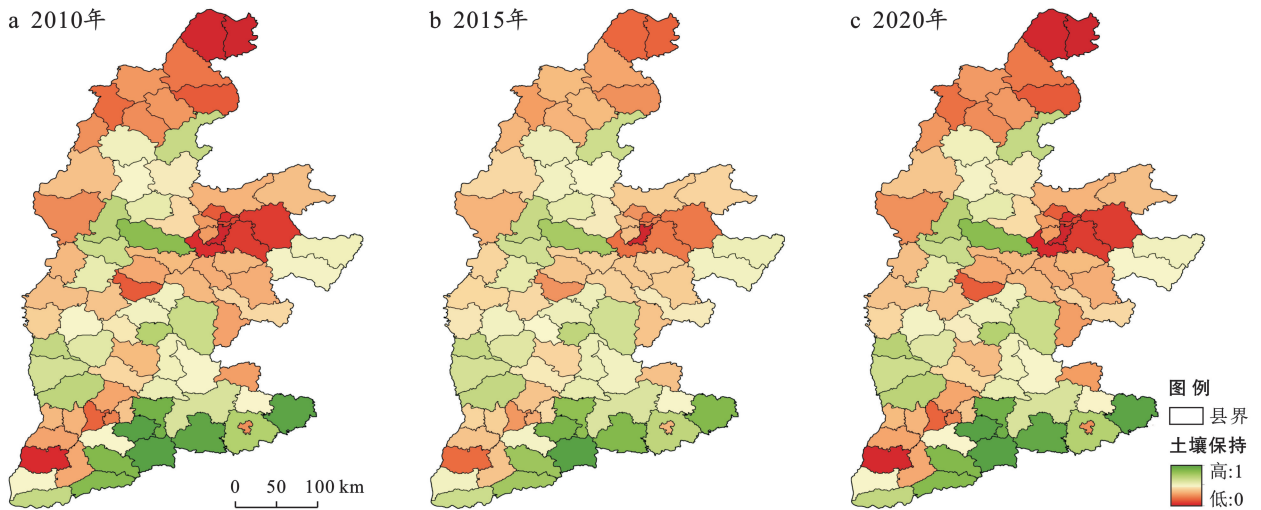


图 3 2010—2020 年山西省黄河流域土壤保持时空变化

Fig.3 Temporal and spatial changes of soil conservation in Yellow River basin of Shanxi Province from 2010 to 2020

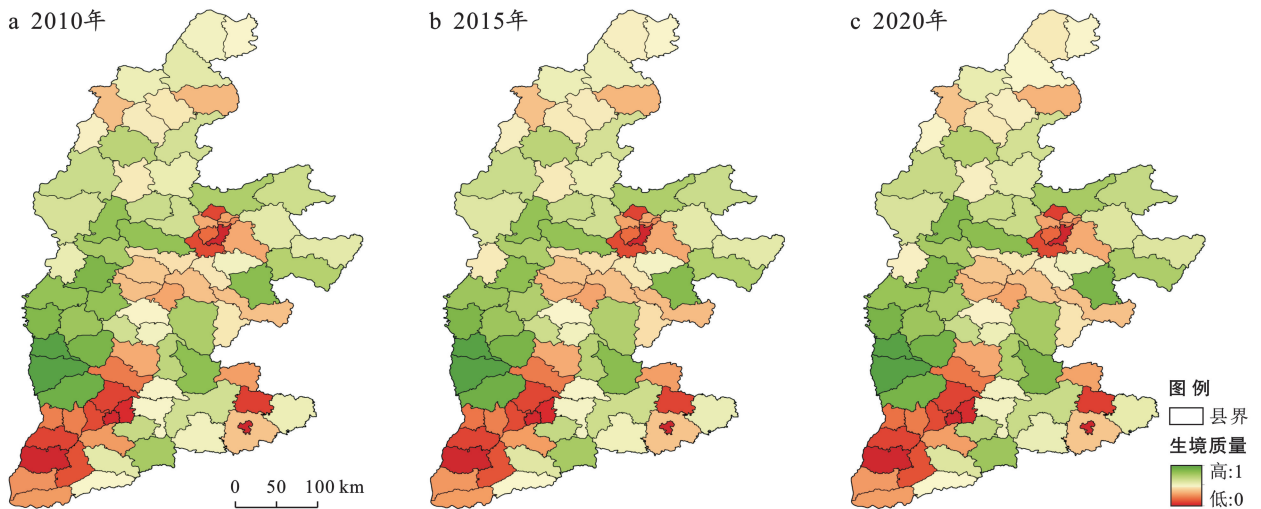


图 4 2010—2020 年山西省黄河流域生境质量时空变化

Fig.4 Temporal and spatial changes of habitat quality in Yellow River basin of Shanxi Province from 2010 to 2020

从空间分布来看,子服务总体呈“中部低,四周高”分布。而粮食产量相反,以“中部高,四周低”变化,这是因为粮食种植区在大片耕地处集聚。从空间变化来看,一半以上的生态系统子服务变化范围不明显,但需要指出的是水源涵养服务和粮食产量服务变

化较大,水源涵养高值有向吕梁山北部扩张的趋势,粮食产量高值明显呈收缩减少的状态。总体而言,2010—2020 年生态系统服务子服务的变化幅度较小,整体呈缓慢发展。

2.1.2 生态系统服务时空演变 2010—2020 年山西

省黄河流域生态系统服务空间分布格局如图 10 所示。生态系统服务总体为“南北纵列,高低相间”发展

态势,生态系统服务综合指数从 0.44 上升到 0.45,增幅为 2.27%,整体呈增长态势,但增幅缓慢。

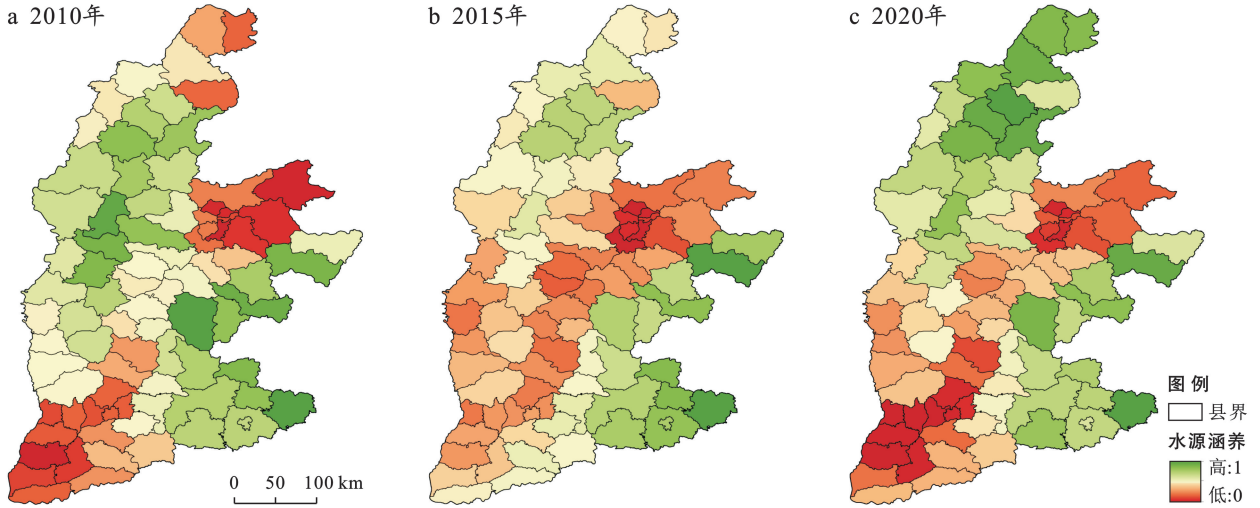


图 5 2010—2020 年山西省黄河流域水源涵养时空变化

Fig.5 Temporal and spatial changes of water conservation in Yellow River basin of Shanxi Province from 2010 to 2020

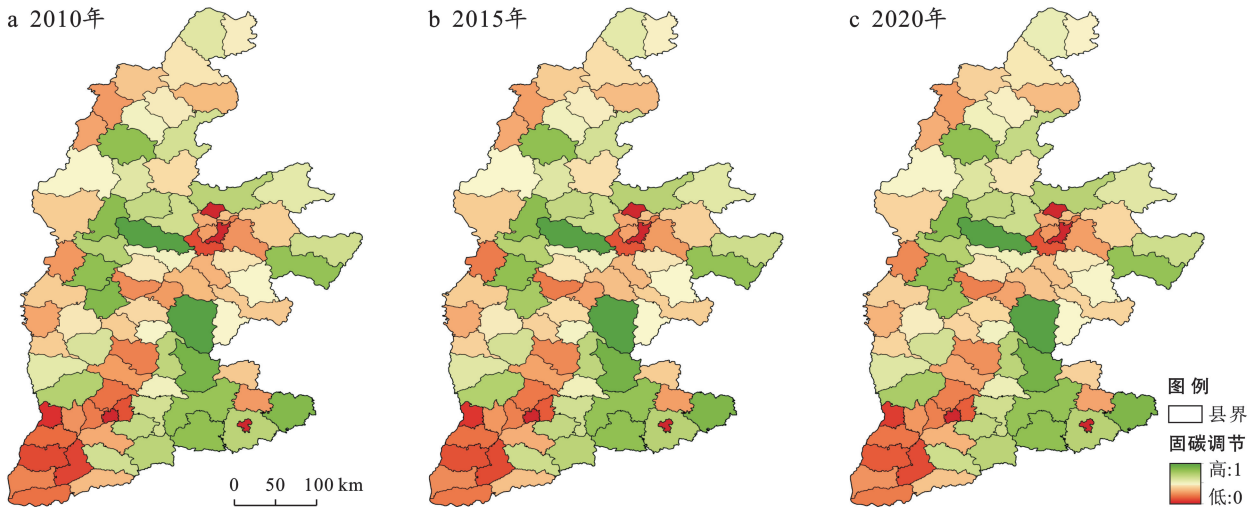


图 6 2010—2020 年山西省黄河流域固碳调节时空变化

Fig.6 Temporal and spatial changes of carbon sequestration regulation in Yellow River basin of Shanxi Province from 2010 to 2020

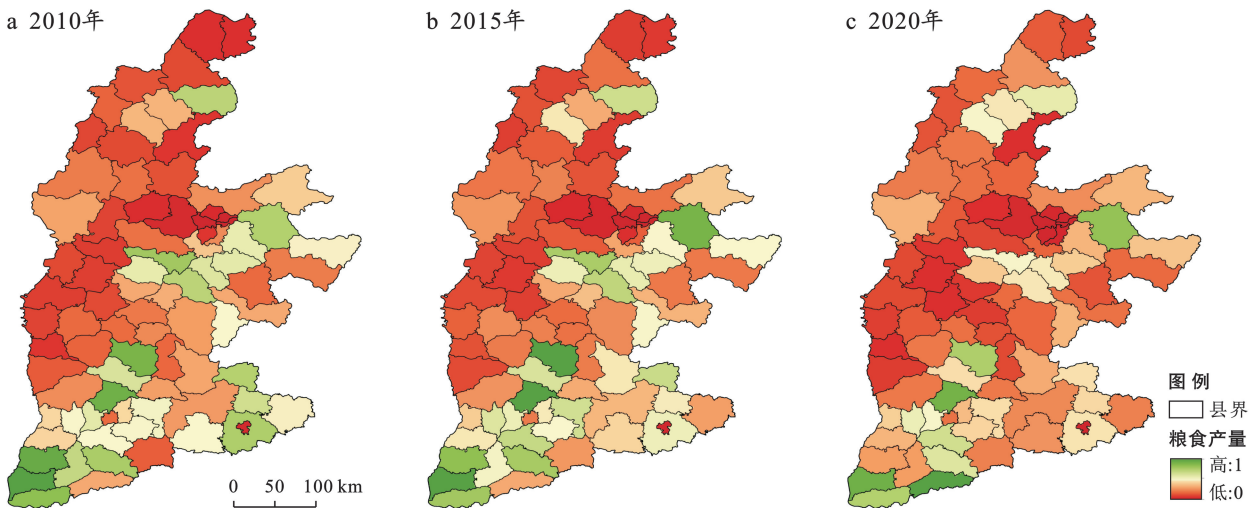


图 7 2010—2020 年山西省黄河流域粮食产量时空变化

Fig.7 Temporal and spatial changes of grain yield in Yellow River basin of Shanxi Province from 2010 to 2020

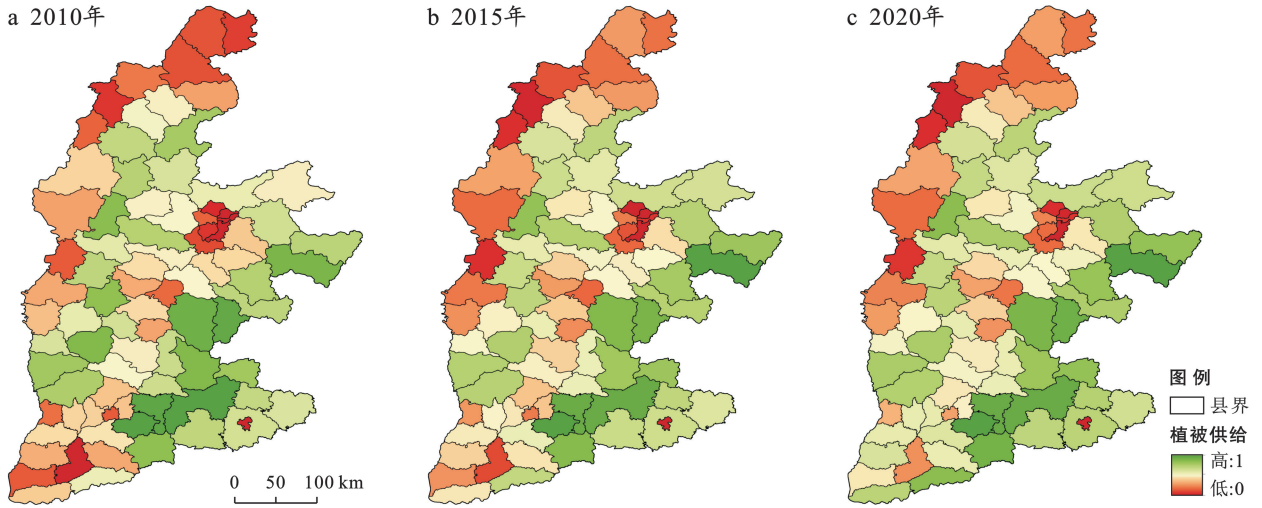


图 8 2010—2020 年山西省黄河流域植被供给时空变化

Fig.8 Temporal and spatial changes of vegetation supply in Yellow River basin of Shanxi Province from 2010 to 2020

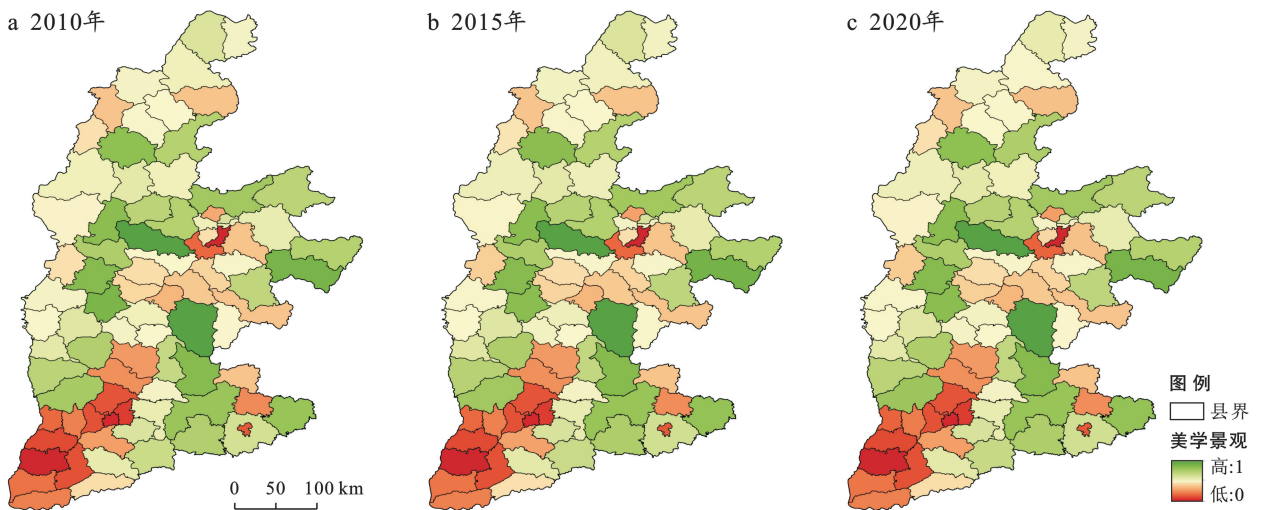


图 9 2010—2020 年山西省黄河流域美学景观时空变化

Fig.9 Temporal and spatial changes of aesthetic landscape in Yellow River basin of Shanxi Province from 2010 to 2020

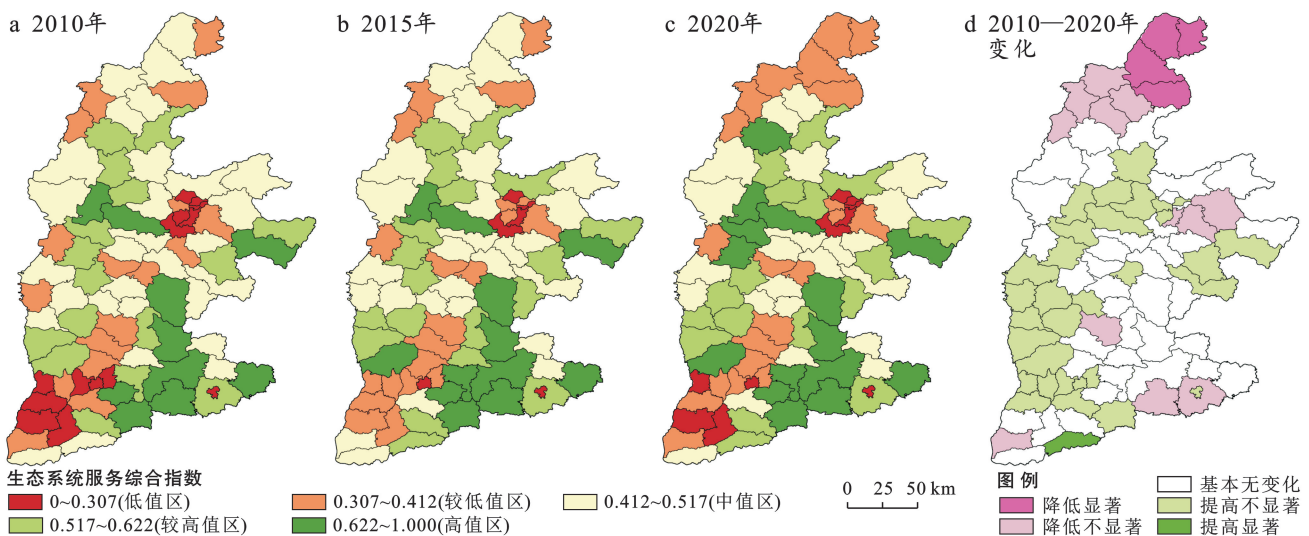


图 10 2010—2020 年山西省黄河流域生态系统服务时空变化

Fig.10 Temporal and spatial changes of ecosystem services in Yellow River basin of Shanxi Province from 2010 to 2020

具体来说,2010—2020年山西省黄河流域生态系统服务高值和较高值区县域比例由30.24%增长到37.21%,主要集中在吕梁山和太岳山—中条山附近,且逐渐在两山处聚集,形成以“两屏”(吕梁山和太岳山—中条山生态安全屏障)为主的双核心模式。而低值和较低值区县域比例不变,为37.21%,主要分布在中部盆地,且在运城盆地和太原城区集中,2015年有明显的收缩状态,但2020年较低值区在北部管涔山处附近聚集,说明此期间区域内生态系统服务效果欠佳,未来需要多关注北部与内蒙古自治区接壤地区。需要指出的是,造成高低值分布状态的原因是两山区的林草地分布集中,自然保护区也较多,生态功能较优。而中部有连片的耕地,受人为扰动较多,环境超载。总体来看,2010—2020年山西省黄河流域生态系统服务综合指数保持稳定,提高不显著和基本无变化的县域较多。

## 2.2 生态效率时空演变

基于Stata 17平台测算的生态效率检验结果如下表所示(表4)。结果显示,LR(likelihood ratio)(检验统计为238.456,在1%水平上显著,该函数结果有效。

表4 山西省黄河流域生态效率估计结果  
Table 4 Ecological efficiency estimation results of Yellow River basin of Shanxi Province

变量	系数	标准误	变量	系数	标准误
常数项	13.036***	0.994	$\ln K \times \ln D$	-0.012	0.026
$\ln K$	0.452*	0.339	$\ln K \times \ln W$	-0.073*	0.077
$\ln D$	0.140	0.467	$\ln K \times \ln G$	-0.145	0.102
$\ln W$	-1.820***	0.712	$\ln K \times \ln N$	-0.027	0.017
$\ln G$	2.075***	0.852	$\ln D \times \ln W$	0.073**	0.035
$\ln N$	-0.030	0.116	$\ln D \times \ln G$	-0.407	0.161
$0.5(\ln K)^2$	-0.001	0.015	$\ln D \times \ln N$	0.037**	0.026
$0.5(\ln D)^2$	0.001	0.003	$\ln W \times \ln G$	-0.220	0.299
$0.5(\ln W)^2$	0.163	0.213	$\ln W \times \ln N$	0.230	0.052
$0.5(\ln G)^2$	2.736***	0.872	$\ln G \times \ln N$	-0.462*	0.205
$0.5(\ln N)^2$	0.122	0.04	$\ln K \times \ln D$	-0.012	0.026
sigma-squared		0.298***			0.048
gamma		0.945***			0.011
mu		1.531**			0.282
eta		0.003			0.003
log likelihood function				-103.638	
LR test				238.456	

注:系数为负表示该指标对生态效率起负向影响,反之则为正向影响;\*\*\*、\*\*和\*分别表示在1%、5%和10%的水平下显著。

投入要素的一次和二次项系数可以看出该要素对生态效率的作用方向及程度,交乘项系数则表示两要素间的交互作用。造林面积、固定资产投资产出和

植被覆盖指数弹性系数均为正,因此可以表明植树造林和资产投入对生态效率具有正面促进作用。总人口和夜间灯光指数系数为负,反映出人口增加、经济发展速度增长的同时,会干扰生态系统平衡。交乘项中,造林面积与固定资产投资、总人口、植被覆盖指数和夜间灯光指数的系数为负,反映出人地矛盾、生态建设与经济发展失调等问题;固定资产投资与总人口、夜间灯光指数的系数为正、与植被覆盖指数的系数为负,说明人口增加会助力经济发展,固定资产在生态方面投入较少;总人口与植被覆盖指数的系数为负、与夜间灯光指数的系数为正,说明人类可能在追求自身利益的同时破坏环境,人口增长会提升经济活跃度;植被覆盖指数与夜间灯光指数的系数为负,说明地区生态状况和经济发展相抵触。

基于GIS平台,对测算的结果进行可视化处理,得到2010—2020年山西省黄河流域生态效率时空变化(图11)。如图所示,生态效率总体为“中部低,四周高”分布格局,其空间分布特征与生态系统服务发展特征基本一致。生态效率总体呈上升趋势,均值从0.23上升到0.33,增幅为43.48%,生态效率得到一定程度的增长,但仍反映出大部分县域生态效率偏低,投入与产出的比例还处于非健康状态。

具体来看,2010—2020年山西省黄河流域生态效率高值和较高值区县域比例由31.40%降低到27.91%,零散分布在沿黄河、沁河和东部临近河北省的区域,且有向东部集中的趋势。低值和较低值区县域由48.84%降至38.37%,分布在中部盆地和吕梁山附近,呈明显收缩态势。虽然高效率县域比例减少,但低效率县域明显降低,说明随着时间变化低效率县域不断为高质量发展蓄能,未来需要多关注高效率县域经济增长与环境压力的动态关系。值得注意的是,高效率县域是经济发展水平较高,公共服务及基础设施较完善和生态环境稍好的县/区,低效率区域主要集中在经济基础薄弱和自然环境较差的县域,且外围的县域与其他省份联系较为紧密,而中部地区发展快但后劲不足。总体来看,2010—2020年山西省黄河流域生态效率稳步提升,提高显著和提高不显著的县域较多。

## 2.3 生态绩效结果分析

### 2.3.1 相关性结果解析

分析生态绩效因子的交互作用有助于理解生态保护与经济融合的驱动机制。探测结果表明(图12),2010—2020年时间尺度内,生态系统服务指标之间大多数呈正相关,生态效率因子之间大多呈正相关,而两大系统相互作用大多呈负相关;这表明,生态系统服务指标互动关系明显,

生态效率投入与产出比例较合理,但也反映出山西省黄河流域高质量发展还待蓄势赋能。在 91 对相关性因子分析中,有 46 对因子相关性呈增长趋势,45 对因子相关性呈减少趋势。其中,增长幅度最大的是固定资产投资与国内生产总值,增幅 10.53%,减少幅度最大的是粮食产量与总人口,降幅 54.67%。固碳调节和美学景观相关性最大, Pearson's  $r$  为 0.93,粮食产量和国内生产总值相关性最小, Pearson's  $r$  为 0.02。

从 Mantel test 检验结果来看 (Mantel's  $p$  和 Mantel's  $r$ ),生态系统服务和生态效率两大系统选取的因子对其响应较显著。需要指出的是,土壤保持、粮食产量和碳排放是导致山西省黄河流域生态绩效空间异质性的主导因素。综合来说,2010—2020 年间,不论是因子之间的 Pearson 相关性,还是两大系统与因子之间的 Mantel test 检验,总体都有随着时间减小的趋势,未来需要多关注生态绩效指标多样性。

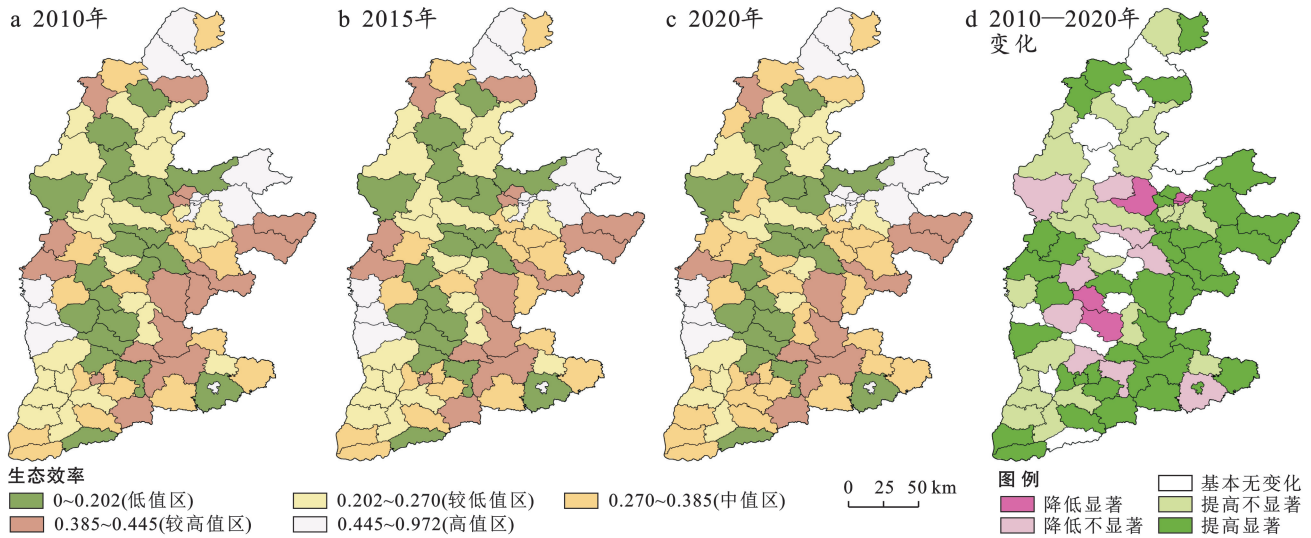
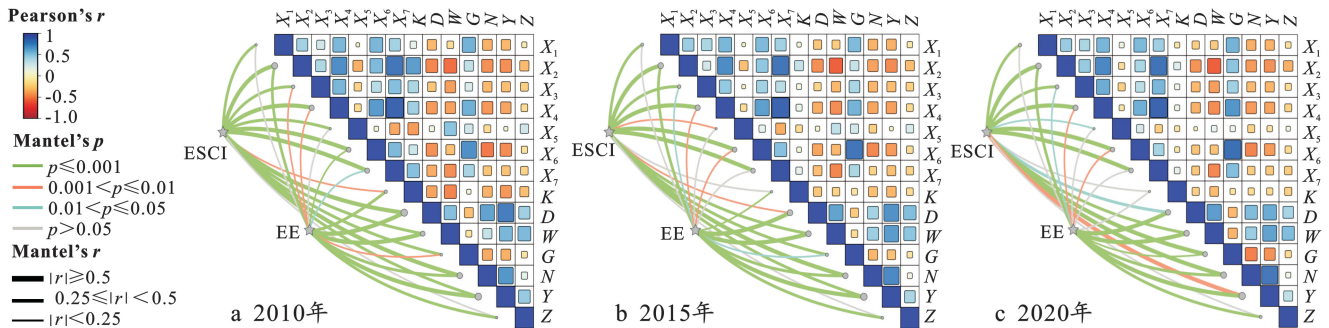


图 11 2010—2020 年山西省黄河流域生态效率时空变化

Fig.11 Temporal and spatial changes of ecological efficiency in Yellow River basin of Shanxi Province from 2010 to 2020



注:  $X_1$  到  $X_7$  依次为土壤保持、生境质量、水源涵养、固碳调节、粮食产量、植被供给、美学景观;  $K, D, W, G, N, Y$  和  $Z$  依次为造林面积、固定资产投资、总人口、植被覆盖指数、夜间灯光指数、国内生产总值、碳排放; ESCI 和 EE 分别代表生态系统服务和生态效率; 曲线代表 Mantel's  $r$  的绝对值大小, 线条越粗, 绝对值越大, 两矩阵结构之间的相关性越强; 线条的颜色代表 Mantel's  $p$  的值,  $p$  值  $< 0.05$  为显著。

图 12 2010—2020 年山西省黄河流域生态系统服务与生态效率相关性

Fig.12 Correlation between ecosystem services and ecological efficiency in Yellow River basin of Shanxi Province from 2010 to 2020

2.3.2 生态绩效时空演变 2010—2020 年山西省黄河流域生态绩效空间分布格局如图 13 所示。生态绩效总体呈“中部低, 四周高”分布特征。生态绩效总体呈上升趋势, 均值从 0.34 上升到 0.46, 增幅为 35.29%。

具体来看, 2010—2020 年山西省黄河流域高绩效和中高绩效县域比例不变, 为 27.91%, 零散分布在永和县、孟县和右玉县等外围县/区, 在系舟山和沁河

附近较集中, 且有北移的趋势。而低绩效和中低绩效县域由 50.00% 降至 37.21%, 集中在吕梁山北部、运城盆地、火焰山和临汾盆地交界处, 呈有明显向研究区中心收缩的趋势。总体而言, 2010—2020 年山西省黄河流域生态绩效提高的县域较多, 提高显著和提高不显著的县域占研究区总县域的 66.28%, 说明近年来注重生态保护和高质量发展双轨驱动。分

析来看,高绩效区域经济和生态同步发展,而低绩效区域由于城市密集、资源过度开发给生态环境带来不

可承受的压力,处于生态基础薄弱和发展滞后的艰难阶段。

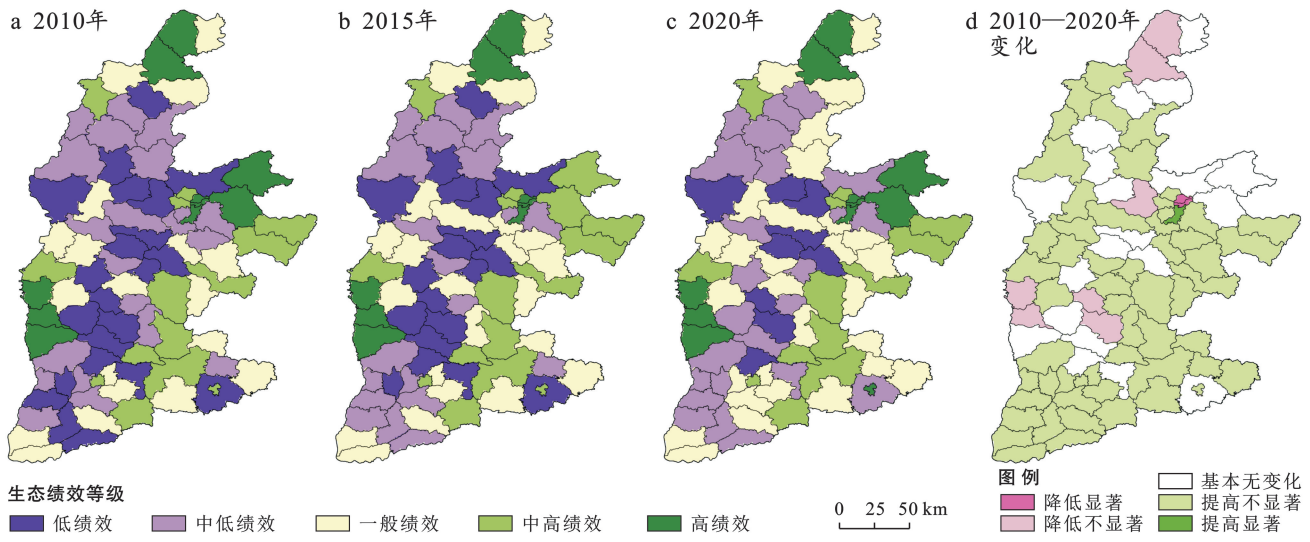


图 13 2010—2020 年山西省黄河流域生态绩效时空变化

Fig.13 Temporal and spatial changes of ecological performance in Yellow River basin of Shanxi Province from 2010 to 2020

### 2.4 山西省黄河流域生态绩效分区优化

山西省黄河流域生态绩效优化应坚持“自然调节为主,人工优化为辅”的基本要领,根据各县域的自然本底特征和发展战略,因地制宜地针对不同层级进行分类施策,从现实层面对区域提出战略措施,最终实现人与自然和谐发展。本文基于区域发展相关性理论,依据各县域不同的生态绩效水平现状和空间分布特征,响应并衔接《山西省生态功能区划》和《山西省黄河流域生态保护和高质量发展规划》,继而将山西省黄河流域分为生态绩效重塑区、生态绩效改良区、生态绩效缓冲区、生态绩效提升区和生态绩效保育区(图 14)。需要强调的是,5 个区域具体任务的实施要遵循“生态优先,保护为主”方针。

合理配置,打造支撑黄河流域高质量转型发展活力区域,发挥资源禀赋优势,建立安全、低碳、清洁和可持续发展的煤炭综合利用体系,加大清洁能源的使用,实现产业转型与产业互融路径。

(1) 生态绩效重塑区。主要集中在中部盆地和汾河流域,占总研究区县域数量的 45.35%,主要特点为生态绩效整体基础薄弱,对生态效益的关注度不够。此区域是全省人口集聚度最高、生产要素最密集、创新潜力最大的区域,主要用地类型为耕地和建设用地,城镇化水平和土地利用率较高,使得大量自然生态用地被占用,生态与经济呈现严重失调状况,亟需通过有效的人为干预来促进可持续发展。针对上述,该区域生态绩效提升方向是区域协同转型。此地城镇区域集中且范围大,刻意进行生态系统修复不现实,所以建议在严格生态保护的前提下,加大转型力度,由原来的粗加工、高污染、高排放模式转向精加工、零污染、零排放的工业模式,并强化轴带空间效应,推动经济要素向城市流动,促进城市间生产要素

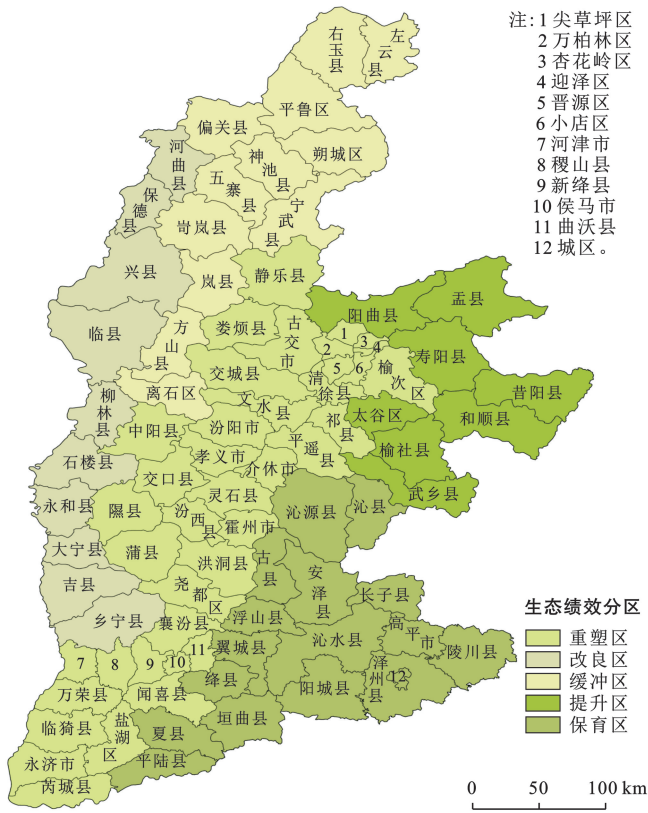


图 14 山西省黄河流域生态绩效分区  
Fig.14 Zoning of ecological performance at Yellow River basin in Shanxi Province

(2) 生态绩效改良区。主要分布在黄河中游靠近陕西省沿线, 占总研究区县域数量的 11.63%, 主要特点为生态绩效状况较差。此区域内生态系统退化稍严重, 各县域生态绩效趋向于中度和轻度失调, 经济内劲不足。因此, 此区域生态绩效提升方向主要是发挥区位优势, 合理开发和综合利用区域旅游资源、动植物资源和水力资源, 重点发展生态旅游、乡村旅游等生态产业, 依托“黄河一号”旅游公路, 构建“母亲黄河、龙腾黄河、多彩黄河、生态黄河”国家旅游精品线路, 打造黄河文化保护传承廊带, 提升经济和生态融合力, 统筹推进山水林田湖草沙系统治理、环境整治与美丽乡村建设, 提升投入产出效益, 实现经济和生态增质提效交融互动, 走文化资源与旅游经济互融路径。

(3) 生态绩效缓冲区。主要分布在吕梁山北部和靠近内蒙古自治区区域, 占总研究区县域数量的 13.95%, 主要特点为生态绩效水平不稳定, 较为脆弱。此区域位于吕梁山生态安全屏障, 生态系统服务功能较完备的同时, 投入与产出比例的合理性较为欠缺, 所以导致此区域生态绩效水平略低, 高质量发展结构不太稳定。因此, 此区生态绩效提升方向为辅治理、补短板。加强汾河源头区保护, 推进亚高山草甸保护建设, 逐步恢复生物多样性, 开展废弃矿山、采石场等工矿用地治理与管理, 以及水土流失和石漠化的防治工程等, 补齐此地经济发展受限短板, 将生态产品优势转化为经济产品优势, 形成区域特色产业链, 充分挖掘吕梁山特优农产品、畜产品的生产和发展潜力, 实现自然资源保护与经济建设协同发展, 推进源头治理与产业发展路径。

(4) 生态绩效提升区。主要分区在太岳山北部和靠近河北省区域, 占总研究区县域数量的 9.30%, 主要特点为生态绩效状况较好。此区域生态绩效情况中等偏上, 受人类负面活动干扰较小, 生态系统服务与生态效率耦合性处于优等状态, 基本可以稳定推进高质量发展。因此, 此地生态提升方向主要是维持生态绩效本底, 避免出现生态功能退化或生态效率低下等状况, 以此争取较优越的条件。此地处于生态功能区和生态农业区交界处, 所以需要提高生态产品的生产力, 合理开发绿色农牧, 提高农业的集约化、专业化和高效化水平, 缓减环境压力, 增强生态韧性。在不破坏原有的生态环境情况下, 科学、合理地开展经济建设活动, 实施绿色农业与保护自然路径。

(5) 生态绩效保育区。主要分布在太岳山以西沁河流域, 占总研究区县域数量的 19.77%, 主要特点为生态绩效状况良好且稳定。该区域的生态系统绩效活力明显高于其他区域, 并且有稳步提升的趋势。

此地生态本底质量高, 生物多样丰富, 生态保护和高质量发展高度协调。生态绩效功能趋于完备的同时, 与其拥有生态功能区, 风景名胜区和森林公园等大量自然保护地, 处于太岳山—中条山生态安全屏障等息息相关。因此, 该区域生态绩效提升方向主要是维持、保护现有的自然生态环境, 充分发挥生态安全屏障的作用, 重点保护沁河源头、汾河支流源头水源涵养功能, 保护历山典型生态系统, 开展生态空间分区保护, 推进生物多样性综合防治路径。

### 3 结论

辨析生态系统服务和生态效率的关系、研究和分析生态绩效时空变化趋势, 对促进山西省黄河流域生态保护和高质量发展具有显著意义。本文利用 InVEST 模型、SFA 模型和耦合协调度模型等, 分析了山西省黄河流域生态绩效的时空变化, 并对研究区进行分区优化, 得出以下结论。

(1) 2010—2020 年山西省黄河流域生态系统服务总体为“南北纵列, 高低相间”发展态势, 生态系统服务均值从 0.44 上升到 0.45, 增幅为 2.27%。

(2) 2010—2020 年山西省黄河流域生态效率总体为“中部低, 四周高”分布格局, 生态效率均值从 0.23 上升到 0.33, 增幅为 43.48%。

(3) 通过相关性检验得知, 固碳调节和美学景观相关性最大, 粮食产量和国内生产总值相关性最小, 土壤保持、粮食产量和碳排放是导致山西省黄河流域空间异质性的主导因素。

(4) 2010—2020 年山西省黄河流域生态绩效总体呈“中部低, 四周高”分布特征, 生态绩效总体呈上升趋势, 均值从 0.34 上升到 0.46, 增幅为 35.29%。

(5) 基于区域发展相关性理论, 综合生态绩效时空布局和相关规划, 把山西省黄河流域分为生态绩效重塑区、生态绩效改良区、生态绩效缓冲区、生态绩效提升区和生态绩效保育区, 并对每个区域提出相应提升路径。

### 4 讨论

山西省黄河流域中部地区(汾河沿线)生态绩效较低。此地处于全省经济实力最强的区域, 推动生态保护与高质量发展迫在眉睫, 而汾河流域在生态保护和修复、河道整治等一些项目仍然存在资金缺口较大、进度缓慢等问题, 且大量生态用地被建设用地占用, 未来如何在生态景观带建设和保持该地经济地位之间权衡成为该地最严峻的难题。还需关注吕梁山、太岳山—中条山两大生态安全屏障, 两山在保障全省

生态安全中发挥着重要作用,未来需统筹山水林田湖草沙综合治理、系统治理、源头治理,筑牢绿色生态屏障。2010—2020年间,山西省黄河流域经济发展和生态保护矛盾关系虽有所缓解,但该区域仍处于高质量发展初级阶段,存在生态系统待优化、生态效率待提升和生态绩效待协调三方面问题,尚且没发挥出沿黄地区的优势。而高质量转型和生态质量改善是一个并行且循环的过程,未来需要不断促进山西省黄河流域生态绩效稳步提升,探寻适合山西省黄河流域生态保护和经济发展高度协调的新路径与支撑点,通过人为干预使投入与产出达到平衡,同时关注生产活动对生态系统的干扰,融合各学科理论对生态绩效进行研究,探寻生态保护和高质量发展的并行措施,实现两者有机融合、良性互动。在两者协同发展的可持续之路上踏出生态绩效研究的新路径才是必然趋势。

### 参考文献(References)

- [1] Lan Feng, Hui Zhao, Bian Jing, et al. Ecological well-being performance evaluation and spatio-temporal evolution characteristics of urban agglomerations in the Yellow River basin [J]. *Land*, 2022, 11(11): 2044.
- [2] Whitford V, Ennos A R, Handley J F. "City form and natural process": Indicators for the ecological performance of urban areas and their application to Merseyside, UK [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2001, 57(2): 91-103.
- [3] 常梦杰. 基于 DEA-SBM 模型的黄河流域生态效率研究 [J]. *现代商贸工业*, 2022, 43(4): 4-6.  
Chang Mengjie. Study on ecological efficiency of Yellow River basin based on DEA-SBM model [J]. *Modern Business Trade Industry*, 2022, 43(4): 4-6.
- [4] 范昀昀. 长三角城市群生态效率评价研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2021.  
Fan Yunyun. Research on ecological efficiency evaluation of urban agglomeration in the Yangtze River delta [D]. Hefei: Anhui University, 2021.
- [5] Thinh N X, Behnisch M, Ultsch A. Examination of several results of different cluster analyses with a separate view to balancing the economic and ecological performance potential of towns and cities [M] // *Studies in Classification, Data Analysis, and Knowledge Organization*. Berlin & Heidelberg: Springer, 2007: 289-296.
- [6] Lovell S T, Johnston D M. Designing landscapes for performance based on emerging principles in landscape ecology [J]. *Ecology and Society*, 2009, 14: art44.
- [7] Baholli I, Stana A, Meka E, et al. Can Albanian Port area be part of the European network of eco-ports based on environmental information systems? [J]. *Journal of Educational and Social Research*, 2013: 139-148.
- [8] 黄凡. 企业集群生态绩效评价指标体系及评价模型研究 [D]. 广西南宁: 广西大学, 2008.  
Huang Fan. The study of index system and evaluation models on ecological performance of enterprise clusters [D]. Nanning, Guangxi: Guangxi University, 2008.
- [9] 安超, 沈清基. 基于空间利用生态绩效的绿色基础设施网络构建方法 [J]. *风景园林*, 2013, 20(2): 22-31.  
An Chao, Shen Qingji. Method of constructing network of green infrastructure based on ecological performance of space utilization [J]. *Landscape Architecture*, 2013, 20(2): 22-31.
- [10] 孟雪, 狄乾斌, 季建文. 京津冀城市群生态绩效水平测度及影响因素 [J]. *经济地理*, 2020, 40(1): 181-186.  
Meng Xue, Di Qianbin, Ji Jianwen. Measurement on the level of the urban ecological performance and analysis of influential factors in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. *Economic Geography*, 2020, 40(1): 181-186.
- [11] 邓元杰. 黄土高原退耕还林工程生态绩效评价研究 [D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.  
Deng Yuanjie. Research on ecological performance evaluation of the sloping land conversion program in the Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [12] Chen Yufeng, Ma Lihua, Zhu Zhitao. The environmental-adjusted energy efficiency of China's construction industry: A three-stage undesirable SBM-DEA model [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28(41): 58442-58455.
- [13] 曾贤刚, 牛木川. 高质量发展下长江经济带生态效率及影响因素 [J]. *中国环境科学*, 2020, 40(2): 906-918.  
Zeng Xiangang, Niu Muchuan. Measurement and influence factors of ecological efficiency of the Yangtze River economic belt under high quality development conditions [J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(2): 906-918.
- [14] 余艺敏. 成都市都市圈生态绩效评价及影响因素研究 [C] // 2022/2023 中国城市规划年会论文集. 湖北 武汉, 2023.  
Yu Yimin. Ecological Performance Evaluation and Influencing Factors of Chengdu Metropolitan Area [C] // *Proceedings of 2022/2023 China Urban Planning Annual Conference*. Wuhan, Hubei, 2023.
- [15] 柯超. 大城市边缘区新城空间生态绩效评价及管控研究: 以武汉花山生态新城为例 [D]. 湖北 武汉: 武汉理工大学, 2021.  
Ke Chao. Performance of new city space in the fringe of big city: A case study of huashan ecological new city in Wuhan [D]. Wuhan, Hubei: Wuhan University of Technology, 2021.
- [16] 孙久文, 崔雅琪, 张皓. 黄河流域城市群生态保护与经济

- 发展耦合的时空格局与机制分析[J].自然资源学报, 2022,37(7):1673-1690.
- Sun Jiuwen, Cui Yaqi, Zhang Hao. Spatio-temporal pattern and mechanism analysis of coupling between ecological protection and economic development of urban agglomerations in the Yellow River basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2022,37(7):1673-1690.
- [17] 吴树荣,潘换换,姬倩倩,等.基于生态系统服务的山西黄河流域保护优先区识别[J].生态学报,2022,42(20):8126-8137.
- Wu Shurong, Pan Huanhuan, Ji Qianqian, et al. Identification of priority conservation areas in the Yellow River basin of Shanxi Province based on ecosystem services [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(20):8126-8137.
- [18] 付建新.山西黄河流域不同土地利用类型 NDVI 时空变化及其对气温、降水的响应[J].水土保持研究,2023,30(3):364-372.
- Fu Jianxin. Temporal and spatial changes of NDVI of different land covers and their responses to temperature and precipitation in the Yellow River basin of Shanxi [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(3):364-372.
- [19] 赵云燕.京津冀晋地区生态绩效水平测度及影响因素研究[D].太原:山西财经大学,2023.
- Zhao Yunyan. Study on the measurement of ecological performance level and influencing factors in the Beijing-Tianjin-Hebei-Shanxi region [D]. Taiyuan: Shanxi University of Finance & Economics, 2023.
- [20] 安超.城乡空间利用生态绩效的内涵、表现及内在机理探析[J].城市发展研究,2013,20(6):16-24.
- An Chao. Discussion on the connotation, characteristics and the inherent mechanism of ecological performance of urban and rural space utilization [J]. *Urban Development Studies*, 2013,20(6):16-24.
- [21] 王培家,章锦河,杨良健,等.典型旅游城市生态系统服务时空演变及其影响因素:以黄山市为例[J].生态学报,2024,44(9):3897-3910.
- Wang Peijia, Zhang Jinhe, Yang Liangjian, et al. Spatio-temporal evolution of ecosystem services in a typical tourist city and its influencing factors: A case study of Huangshan City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024,44(9):3897-3910.
- [22] 高阳,沈振,张中浩,等.生态系统服务视角下的社会—生态系统耦合模拟研究进展[J].地理学报,2024,79(1):134-146.
- Gao Yang, Shen Zhen, Zhang Zhonghao, et al. Advance in simulation of social-ecological system coupling under the perspective of ecosystem services [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024,79(1):134-146.
- [23] 彭立,邓伟,黄佩,等.四川盆地多重生态系统服务景观指数评价与服务簇识别[J].生态学报,2021,41(23):9328-9340.
- Peng Li, Deng Wei, Huang Pei, et al. Evaluation of multiple ecosystem services landscape index and identification of ecosystem services bundles in Sichuan Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(23):9328-9340.
- [24] 陈进,陶恩泽,陶红,等.宁夏沿黄城市带耕地碳排放时空特征和生态效率评价[J].水土保持通报,2024,44(3):418-429.
- Chen Jin, Tao Enze, Tao Hong, et al. Spatiotemporal characteristics of carbon emissions and eco-efficiency evaluation of cultivated land for urban belt along Yellow River in Ningxia [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024,44(3):418-429.
- [25] 刘书畅,叶艳妹,肖武.基于随机前沿分析的中国城市土地利用效率时空分异研究[J].中国土地科学,2020,34(1):61-69.
- Liu Shuchang, Ye Yanmei, Xiao Wu. Spatial-temporal differentiation of urban land-use efficiency in China based on stochastic frontier analysis [J]. *China Land Science*, 2020,34(1):61-69.
- [26] 丁莲,白羽萍,张莉金,等.黄河流域城市群土地利用及生态效率时空演变分析[J].生态学报,2023,43(18):7610-7622.
- Ding Lian, Bai Yuping, Zhang Lijin, et al. Spatio-temporal evolution of land use and eco-efficiency in urban agglomerations in the Yellow River basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(18):7610-7622.
- [27] 曾雅婷,李宾,吕亚荣.中国粮食生产技术效率区域差异及其影响因素:基于超越对数形式随机前沿生产函数的测度[J].湖南农业大学学报(社会科学版),2018,19(6):13-21.
- Zeng Yating, Li Bin, Lu Yarong. Regional differences of grain production technical efficiency and its influencing factors in China: A method of stochastic frontier analysis on trans-logarithmic production function [J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Social Sciences)*, 2018,19(6):13-21.
- [28] Pitt M M, Lee L F. The measurement and sources of technical inefficiency in the Indonesian weaving industry [J]. *Journal of Development Economics*, 1981,9(1):43-64.
- [29] 王淑佳,孔伟,任亮,等.国内耦合协调度模型的误区及修正[J].自然资源学报,2021,36(3):793-810.
- Wang Shujia, Kong Wei, Ren Liang, et al. Research on misuses and modification of coupling coordination degree model in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2021,36(3):793-810.