doi. 10. 3724/1005-0566. 20260311

黄河流域环境与产业协同共进的多情景预测分析

薛伟贤,赵　敏,石涵予
(西安理工大学经济与管理学院,陕西　西安　710048)

摘　要:生态承载阈值逼近与产业空间无序拓展的双重压力,加剧了黄河流域环境与产业之间的深层矛盾,凸显了生态安全观下环境与产业协同共进的重要意义。基于黄河流域高质量发展战略愿景,构建"环境—产业复合系统"协同框架,设定基准、环境优先和产业优先三大情景,多情景探讨 2030—2050 年黄河流域环境与产业协同演变趋势。结果表明:(1)黄河流域环境与产业子系统呈"生态优先则产业受限、产业优先则环境超载"的二元悖论,本质是生态韧性失衡与产业发展矛盾的空间投射;(2)三大情景下黄河流域环境与产业协同演化呈"基准结构失衡,环境阶段优化,产业超载锁定"的典型特征,其本质是生态阈值突破、技术路径依赖与制度供给滞后的复合危机。基于此,提出分区精准调控、区域定向扶持、制定动态政策以及建立第三方评估制度的应对策略。

关键词:黄河流域;环境—产业协同;ARIMA 预测;情景分析;复合系统协同度
中图分类号:F061. 5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1005 - 0566(2026)03 - 0122 - 13

Multi-scenario prediction analysis of environment-industry synergy in the Yellow River Basin

XUE Weixian, ZHAO Min, SHI Hanyu
(*School of Economics and Management*, *Xi' an University of Technology*, *Xi' an* 710048, *China*)

Abstract: The dual pressures of approaching ecological carrying capacity thresholds and the disorderly expansion of industrial space have intensified the deep-seated contradictions between the environment and industry in the Yellow River Basin, highlighting the critical importance of environmental-industrial synergy under the framework of ecological security. Based on the strategic vision for high-quality development in the Yellow River Basin, this study constructs a collaborative framework for an "environment-industry composite system" and establishes three scenarios—baseline, environment-first, and industry-first—to explore the trends in the coordinated evolution of the environment and industry in the Yellow River Basin from 2030 to 2050 through multi-scenario analysis. The results indicate: ①The environmental and industrial subsystems in the Yellow River Basin exhibit a dichotomous paradox where "ecological priority restricts industry, while industrial priority leads to environmental overload," which is essentially a spatial projection of the imbalance in ecological resilience and the contradictions in industrial development. ②Under the three scenarios, the co-evolution of the environment and industry in the Yellow River Basin exhibits typical characteristics of "imbalanced baseline structure, phased environmental optimization, and locked-in industrial overload." This essentially represents a

基金项目:国家自然科学基金资助项目"黄河流域环境保护与产业协同发展机理、动态评价与实现路径研究"(72273103);国家社会科学基金青年项目"黄河中下游段跨区域森林生态补偿机制研究"(23CGL032);陕西省社会科学基金资助年度项目"黄河流域减污降碳协同增效评估及实现路径研究"(2025D028)。

作者简介:薛伟贤(1967—),男,陕西西安人,西安理工大学经济与管理学院教授、博士生导师,研究方向为创新与区域发展。通信作者:赵敏。

compound crisis involving the breach of ecological thresholds, technological path dependence, and lagging institutional supply. Based on this, the study proposes response strategies including zone-specific precise regulation, regionally targeted support, the formulation of dynamic policies, and the establishment of a third-party evaluation system.

Key words: Yellow River Basin; environment-industry synergy; ARIMA forecasting; scenario analysis; composite system synergy

黄河流域作为中国重要的生态屏障和经济地带,拥有丰富的自然资源和独特的生态系统,对维护国家生态安全和推动区域经济发展具有重要作用。然而,随着工业化和城市化的快速推进,工业污染、产业结构不合理等经济粗放型增长问题导致该流域环境保护与产业发展之间的矛盾日益尖锐。2021 年 10 月,中共中央、国务院联合印发《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》并强调:分阶段规划黄河流域高质量发展目标,更有序、更科学地推进黄河流域生态保护和高质量发展工作,在确保生态安全前提下推动产业转型升级,实现绿色、协调、可持续发展。2024 年 9 月,习近平总书记在全面推动黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上明确提出,要“持续完善黄河流域生态大保护大协同格局,筑牢国家生态安全屏障”。这两大战略论述共同将黄河流域生态保护和高质量发展的核心议题,聚焦于“环境—产业复合系统”在生态安全约束下协同演化路径与情景差异特征的系统解析。

20 世纪 80 年代,《我们共同的未来》正式定义“可持续发展”,引发了学术界对环境保护和经济发展关系的研究热潮。主要研究内容包括以下几个方面。①环境库兹涅茨曲线(EKC)。早期研究基于环境库兹涅茨曲线假说,提出经济增长与环境污染之间存在的“倒 U 型”关系[1-3],即环境质量随人均收入增长呈现先恶化后改善的趋势。也有学者基于环境库兹涅茨曲线预测我国经济与碳排放间的相关问题[4-5]。②环境规制与经济增长。随着 EKC 理论研究的不断深入,环境规制如何协调经济增长与生态约束的矛盾逐渐成为研究焦点。主要集中在不同环境规制政策对经济增长的影响效果与传导机制[6-9],以及环境规制设计和工具运用等理论与政策问题[10]。③地区政策与经济增长。此时,关于生态环境与经济发展的研究重点转向了如何通过政策导向促进绿色经济发展[11],以及如何通过地区导向战略实现节能减排[12],提高地方环境治理效率[13]。既有研究虽为阐释经济发展与环境保护的互动机理提供了重要洞见,但随着要素禀赋结构的变化,传统“环境—经济”二元分析框架已难以解构复合型生态经济系统的深层矛盾,亟需建构环境与产业协同共生的复合框架。对此,学界最先采用耦合协调度模型分析环境与产业系统的协调机理及路径[14-16],但其静态化评估范式缺少对主体间非线性互构机制的动态研究,难以揭示环境与产业之间的协同演化规律和非线性反馈机制。在此基础上,研究转向协同学视角下的动态建模,如基于序参量支配原理,将复合系统协同度模型[17]、哈肯模型[18]与情景分析法、地理探测器等方法相结合识别驱动因素,构建突破路径。

鉴于复合系统协同度模型通过多维度指标体系量化子系统间协同水平,能够从时间序列反映系统演化趋势,较哈肯模型及系统动力学模型更便于识别子系统短板。而情景分析法的多情景推演则揭示了不确定性环境下的潜在路径,在结合定性与定量分析的基础上,提出差异化策略,相较于波士顿矩阵和仿真模拟方法,更适用于复杂系统的动态治理。因此,本文将复合系统协同度与情景分析法系统整合,前者反映系统协同度随时间的变化趋势,后者研究不同情景设定下各因素潜在演变造成的差异性影响,科学预判不同政策导向下黄河流域环境与产业协同演化趋势,以期为黄河流域可持续发展提供科学依据和决策支持。

一、理论分析及要素选取

(一)理论分析

协同学(synergetics)主要研究复合系统中大量子系统在特定条件下通过动态复杂协作与竞争,持续进行物质、能量和信息的交换。这一交换

过程强化了子系统间的关联与互动,促使整个复合系统自发地从无序状态转变为具有特定时空结构和功能特性的有序状态,从而实现从无序到有序的协同演化[19]。环境与产业复合系统由具有不同属性的环境子系统和产业子系统复合而成,文中将环境子系统界定为围绕人群且能直接或间接影响人类生活发展的自然因素[20],产业子系统则界定为《国民经济行业分类》(GB/T 4754—2017)及《三次产业划分规定》所提出的第一、第二和第三产业。

在复合系统协同过程中,环境子系统与产业子系统之间存在复杂的非线性相互作用关系(见图 1)。一方面,环境子系统约束产业子系统运行。随着环境治理的持续推进,良好的生态环境能够为产业发展提供稳定的资源基础,并提升资源利用效率。而当环境承载能力被突破时,资源过度开发与污染物排放刚性将引发生态要素错配与负外部性成本内部化压力,提高产业运行成本,约束产业可持续发展。另一方面,产业子系统重构环境子系统基底。产业绿色转型、污染治理技术的应用可以修复受损的生态环境,增强环境承载力。反之,粗放式的资源消耗、污染物超量排放等将加剧环境污染,甚至造成不可逆的生态损害。

就环境子系统而言,黄河流域协同治理应首先开辟一条以生态保护为基石、生态修复为先导的可持续路径[21]。区域生态环境状况的优劣,主要取决于环境质量和资源禀赋,并持续受到环境压力和环境抗逆的动态影响。其中,环境压力指人类活动对自然环境产生的直接或间接影响,是引发环境变化的重要因素,体现在资源消耗、污染物排放等方面;环境抗逆则是针对环境压力所采取的政策与管理响应,通过合理的政策引导和有效的管理手段,缓解环境压力对环境状况的不利影响。就产业子系统而言,产业发展进程高度依赖于产业结构、产业集聚和产业竞争之间的复杂联动与协同互促[22]。产业结构涵盖了工业发展水平、产业高级化程度及高新技术产业等多维度内涵,其动态调整与持续优化,吸引各类相关企业和资源向特定区域加速汇聚;产业集聚指产业发展在空间布局上的集中体现,直观反映了产业在特定区域内的集中趋势、集聚密度以及空间分布特征。有效的产业集聚不仅能够通过搭建合作平台形成规模经济效应,还能凭借其强大的技术溢出和资源共享优势,对产业结构升级产生积极的反哺作用;产业竞争作为产业发展的重要驱动力,展现了产业在国际市场的拓展能力、对技术研发的投入程度、技术成果的转化效率,以及工业企业的技术创新活力与实力。同时,它能够倒逼产业结构不断调整与优化,促进产业朝着更高质量、更具竞争力的方向发展。

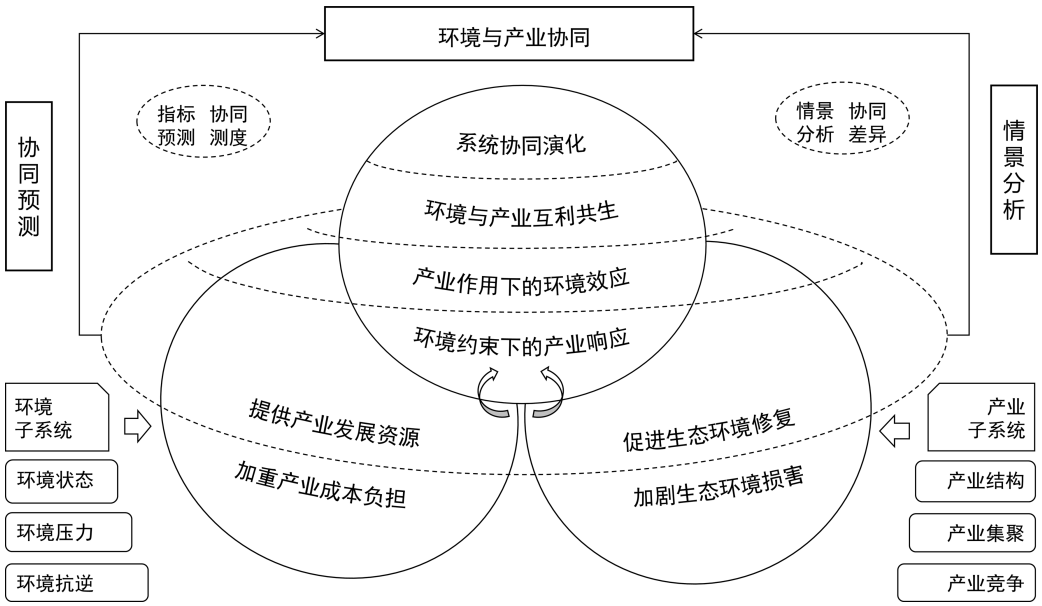


图 1 环境与产业协同相互作用关系

(二)复合系统构成要素选取

基于理论分析,参考张扬等[23]、杨永芳等[24]、史利江等[25]的研究,构建环境与产业子系统测度指标体系。对各指标数据采用 Z-Score 法进行标准化处理,并通过多重共线性检验剔除政府环保支出占比、高新技术企业净利润、工业区位商系数、产业集聚水平和规模以上工业企业专利申请数 5 个共线性较强的指标(见表 1)。

表 1　环境与产业子系统测度指标体系

目标层	准则层	指标层	属性	衡量方式	权重		
					基准	环境优先	产业优先
环境子系统	环境状态	X_1 空气质量优良率(%)	+	(空气质量优良天数/总观测天数)×100%	7.32	7.32	7.32
		X_2 水资源总量(亿 m^3)	+	地表径流量+降水入渗补给地下水量	7.05	6.96	7.05
		X_3 森林覆盖率(%)	+	(森林面积/土地总面积)×100%	4.80	4.79	4.80
		X_4 建成区绿化面积覆盖率(%)	+	城市建成区绿化覆盖面积/建成区总面积[26]	5.09	5.06	5.10
	环境压力	X_5 工业废水排放量(万吨)	−	报告期内经过企业厂区所有排放口排到企业外部的工业废水量	5.14	5.13	5.14
		X_6 工业 SO2 排放量(吨)	−	报告期内企业在燃料燃烧和生产工艺过程中排入大气的二氧化硫总质量	5.72	5.72	5.72
		X_7 工业烟粉尘(吨)	−	报告期内企业在燃料燃烧和生产工艺过程中排入大气的烟尘及工业粉尘的总质量之和	5.17	5.17	5.17
		X_8 工业二氧化碳排放量(吨)	−	工业能源消耗量×排放因子	5.31	5.29	5.31
		X_9 单位 GDP 能耗(吨标准煤/万元)	−	能源消费总量/地区生产总值[15]	5.70	5.75	5.70
	环境抗逆	X_{10} 水土流失治理面积(千公顷)	+	通过实施水土保持措施,对水土流失区域进行治理的面积	4.91	4.91	4.90
		X_{11} 工业污染治理完成投资额(万元)	+	治理废水+治理废气+治理固体废物+治理噪声+治理其他的投资总额	8.74	8.92	8.72
产业子系统	产业结构	Y_1 工业化率(%)	−	工业增加值/GDP	4.20	4.20	4.17
		Y_2 产业结构合理化(/)	+	泰尔指数[27]	6.85	6.87	6.87
		Y_3 产业结构高级化(/)	+	第三产业产值/第二产业产值	4.17	4.16	4.17
	产业集聚	Y_4 高新技术产业集聚水平(/)	+	省高新技术产业从业人数与总从业人数之比/全国高新技术产业从业人数与总从业人数之比	4.07	4.06	4.07
	产业竞争	Y_5 R&D 经费投入强度(%)	+	(企业研发经费支出/企业营业收入)×100%	5.38	5.37	5.39
		Y_6 技术市场成交额(万元)	+	技术领域内的交易活动所形成的总额[28]	10.38	10.32	10.40

基于中国生态保护红线(ERL)政策对环境保护和生态修复的显著积极影响[29]以及其“保障国家和区域生态安全的最低限度空间”的概念内涵,考虑到该指标能够综合反映区域生态保护强度与生态空间管控水平,以“生态保护红线面积占比”替代“水资源总量”“森林覆盖率”和“建成区绿化面积覆盖率”,以“碳排放强度”替代“单位 GDP 能耗”[30],在此基础上重新构建环境与产业子系统指标体系,并重复开展指标预测与协同度测算。结果表明,替代前后两套指标体系下环境与产业协同演变趋势未发生显著变化。

二、研究方法与数据来源

(一)情景分析法

情景预测旨在通过构建多元情景展现未来发展的多种可能路径,本质是应对未来不确定性的一种描述手段[31]。可按不同标准分为短中长期、定性与定量、前推式与回溯式及归纳与演绎等。本文将短中长期与回溯式情景分析相结合,纳入复合系统协同度模型(见图 2),对黄河流域环境与产业协同水平进行预测。

(二)复合系统协同度模型

借鉴孟庆松等[32]提出的复合系统协同度模型,该模型区别于传统耦合协调度模型,能够衡量子系统间因非线性相互作用所产生的“1+1>2”的整体协同效应,从而更深刻地揭示“协同”所强调的竞争、合作与涌现性内涵。将环境与产业复合系统视为 $S=\{S_1,S_2\}$,其中 S_1 为环境子系统,S_2 为产业子系统,假设在给定的初始时刻 t_0,环境子系统有序度为 $u_1^0(e_1)$,产业子系统有序度为 $u_2^0(e_2)$。在复合系统发展演变过程中的另一时刻,假定环境子系统有序度为 $u_1^1(e_1)$,产业发展子系统有序度为 $u_2^1(e_2)$,则环境与产业复合系统协同度计算公式为:

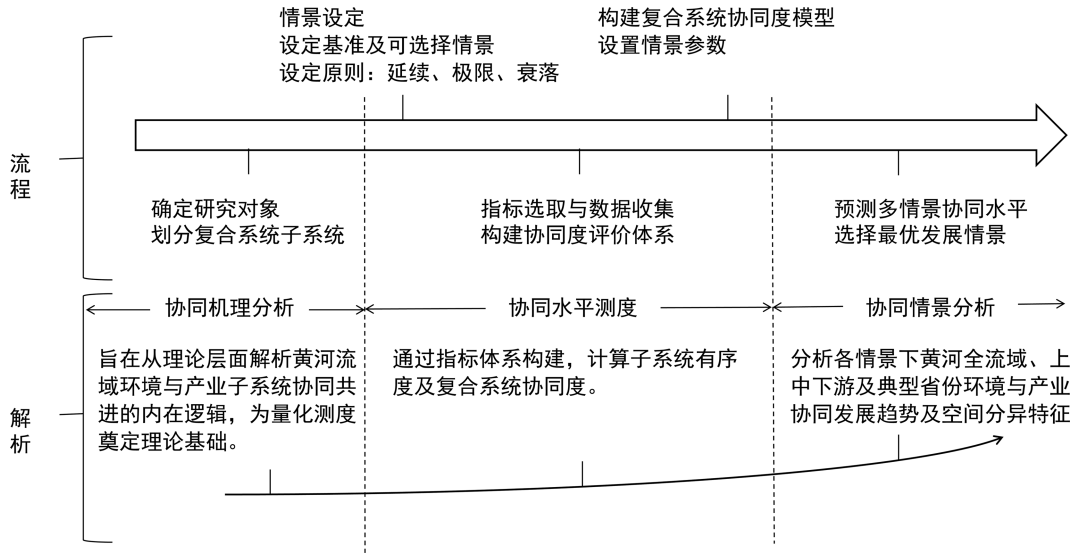


图 2　预测流程及解析

$$cm = sig(\cdot) \times \sqrt{|u_1^1(e_1) - u_1^0(e_1)| \times |u_2^1(e_2) - u_2^0(e_2)|}$$

$$sig(\cdot) = \begin{cases} 1, u_1^1(e_1) - u_1^0(e_1) > 0 \text{ 且 } u_2^1(e_2) - u_2^0(e_2) > 0 \\ -1, \text{其他} \end{cases} \tag{1}$$

其中，$cm \in [-1, 1]$，值越大则复合系统协同发展水平越高，反之则越低[17]（见表 2）。

表 2　复合系统协同水平划分表

协同度	协同水平
$cm \in [-1, -0.666)$	高度不协同
$cm \in [-0.666, -0.333)$	中度不协同
$cm \in [-0.333, 0)$	轻度不协同
$cm \in [0, 0.333)$	轻度协同
$cm \in [0.333, 0.666)$	中度协同
$cm \in [0.666, 1]$	高度协同

（三）ARIMA 预测模型

ARIMA 模型通过自回归、差分和移动平均等方法对时间序列进行建模，使序列达到平稳状态，并刻画其内在自相关结构，从而实现对未来值的预测。本文参考罗巍等[33]的研究，采用 ARIMA 模型对黄河流域环境与产业子系统各指标的未来值进行预测，具体公式为：

$$Y_t^{(d)} = \mu + \sum_{i=1}^{p} \beta_i Y_{t-i}^{(d)} + \sum_{j=1}^{q} \theta_j \varepsilon_{t-j} + \varepsilon_t \tag{2}$$

其中，参数 p、q 分别表示自回归项的阶数与移动平均项的阶数；$Y_t^{(d)}$ 与 $Y_{t-i}^{(d)}$ 分别代表经过 d 阶差分后的预测值与历史值；μ 为白噪声项；β_i 与 θ_j 分别代表自回归项系数与移动平均项系数；ε_t 为 t 时刻的误差项。

对原始序列进行 ADF 平稳性检验，各序列经一阶或二阶差分后，均在 5% 显著性水平下通过平稳性检验。模型参数估计完成后，进一步对残差序列进行白噪声检验，结果显示残差不存在显著自相关。后以 2012—2019 年为估计区间构建 ARIMA 模型，对 2020—2022 年各指标进行动态样本外预测。结果显示，指标预测值与实际观测值较为接近，MAPE（平均绝对百分比误差）均在 10% 以内[34]。在此基础上，利用 2012—2022 年完整样本重新估计模型参数，并对 2026—2050 年各指标进行动态预测。鉴于 ARIMA 模型在长期预测中可能存在误差累积，本文主要关注预测序列的变化趋势及其相对演变特征。

（四）数据来源

选取 2012—2022 年黄河流域环境与产业相关数据，数据来源主要包括《中国环境统计年鉴》《中国水利统计年鉴》《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》以及黄河流域各省（市）统计年鉴。针对个别缺失数据，采用插值法和移动平均法进行补全。

三、情景构建及参数设置

（一）情景构建

《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》

指出,要着力推动黄河流域生态环境保护、污染治理和高质量发展。短期至2030年,黄河流域人水关系进一步改善,流域治理水平明显提高,生态共治、环境共保格局逐步形成;中期至2035年,黄河流域生态保护和高质量发展取得重大战略成果,生态环境全面改善,生态系统健康稳定,现代化经济体系基本建成;长期至2050年,黄河流域生态文明水平大幅提升,现代产业体系和产业生态化发展格局全面实现。基于此,设定基准、环境优先及产业优先3种情景(见表3)。

表3　基于目标分析的情景设计

情景类型	短期	中期	长期
基准情景	生态环境质量稍有改善,产业结构以重化工业为主	资源消耗速度降低,产业竞争力有所增强	生态环境质量提高,产业发展面向现代化
环境优先	生态环境明显改善	生态环境全面改善	生态水平大幅提升
产业优先	加快推进现代化产业体系建设	现代化产业体系基本建成	现代产业体系和产业生态化发展格局全面实现

基准情景是指黄河流域环境与产业子系统保持过去发展特征,不额外采取新的协同措施;环境优先情景是指黄河流域自然生态和区域经济将趋向于协同发展,以“生态先行”倒逼高质量发展,让生态成为产业发展的新动力;产业优先情景是指黄河流域以产业结构升级和转型优化为首,提供一条加快产业升级、促进经济快速增长的发展路径。

(二)基准情景参数

鉴于我国碳达峰碳中和“1+N”政策体系已基本建成,工业废水、工业SO_2和工业烟粉尘的排放已得到有效控制。政策制定者可能不再进一步改善这些已达标的指标,而是集中资源解决其他未达标的环境问题。因此,假设空气质量优良率、工业废水排放量、工业SO_2排放量和工业烟粉尘在基准情景下已达到最佳状态,环境优先情景下将保持这些指标不变;产业结构合理化是产业部门协调发展、资源均衡分配和经济持续向好的关键因素。2024年我国国内生产总值按不变价格计算比上年增长5.0%,说明当前产业结构调整已取得一定成效。假设泰尔指数在基准情景下也已处于相对合理水平,产业优先情景下也将保持该指标不变。其余指标均依据公式(2)进行预测。基于赤池信息量准则(AIC)和贝叶斯信息准则(BIC)对备选模型进行比较与筛选,确定最优模型并测算基准情景下各指标预测值,并以2022年为基期计算基准情景下各指标年均变化率(见表4)。

表4　基准情景下各指标较2022年潜在年均变化率

地区	指标	2026年	2030年	2035年	2040年	2045年	2050年
上游	X_2	0.032 4	0.015 4	0.008 0	0.006 0	0.004 0	0.003 3
	X_3	0.011 0	0.010 6	0.010 3	0.010 0	0.009 7	0.009 5
	X_4	0.006 2	0.007 0	0.007 2	0.007 5	0.007 4	0.007 5
	X_8	0.002 7	0.005 1	0.006 5	0.007 8	0.008 1	0.008 4
	X_9	-0.024 7	-0.024 5	-0.023 1	-0.022 7	-0.023 2	-0.021 5
	X_{10}	0.033 9	0.026 8	0.022 7	0.021 1	0.020 1	0.019 0
	X_{11}	-0.000 5	-0.009 0	-0.014 2	-0.012 0	-0.017 4	-0.013 2
	Y_1	0.012 0	0.010 5	0.009 9	0.010 0	0.009 9	0.009 9
	Y_3	-0.002 2	0.004 2	0.010 3	0.003 0	0.005 3	0.006 9
	Y_4	0.037 7	0.031 3	0.028 0	0.025 8	0.023 6	0.021 4
	Y_5	0.014 8	0.016 4	0.016 7	0.016 5	0.016 1	0.015 7
	Y_6	0.068 9	0.062 4	0.055 1	0.049 8	0.045 7	0.042 3
中游	X_2	0.004 3	0.004 3	0.004 2	0.004 2	0.004 2	0.004 1
	X_3	0.018 6	0.018 0	0.017 3	0.016 6	0.016 0	0.015 5
	X_4	0.003 9	0.003 9	0.003 9	0.003 9	0.003 8	0.003 8
	X_8	0.019 6	0.018 4	0.017 5	0.016 8	0.016 2	0.015 6
	X_9	-0.239 2	-0.157 7	-0.132 8	-0.039 6	-0.056 8	-0.115 0
	X_{10}	0.011 1	0.010 9	0.010 6	0.010 4	0.010 1	0.009 9
	X_{11}	-0.038 2	-0.046 2	-0.051 8	-0.057 0	-0.059 0	-0.060 9
	Y_1	-0.008 2	-0.008 3	-0.008 7	-0.008 9	-0.009 0	-0.009 3
	Y_3	0.020 8	0.020 0	0.019 1	0.018 3	0.017 6	0.017 0
	Y_4	0.005 7	0.005 5	0.005 4	0.005 4	0.005 3	0.005 2
	Y_5	0.007 4	0.007 3	0.007 2	0.007 1	0.006 9	0.006 8
	Y_6	0.078 9	0.069 3	0.060 8	0.054 4	0.049 5	0.045 6
下游	X_2	0.082 4	0.060 5	0.082 7	0.044 2	0.040 0	0.036 9
	X_3	0.015 7	0.013 6	0.020 5	0.012 0	0.011 5	0.011 1
	X_4	0.004 7	0.003 7	0.004 9	0.002 7	0.002 4	0.002 3
	X_8	-0.004 8	0.000 2	0.005 0	0.004 4	0.005 1	0.005 4
	X_9	0.019 4	0.014 8	0.018 3	-0.008 0	-0.009 0	-0.010 6
	X_{10}	0.003 0	0.004 8	0.008 9	0.005 7	0.005 8	0.005 9
	X_{11}	0.036 9	0.030 7	0.044 7	0.025 2	0.023 6	0.022 3
	Y_1	-0.025 7	-0.026 9	-0.046 7	-0.031 5	-0.035 1	-0.036 6
	Y_3	0.008 3	0.009 5	0.019 0	0.012 8	0.013 3	0.013 4
	Y_4	0.028 9	0.005 5	0.006 0	0.004 7	0.000 7	0.003 4
	Y_5	0.023 8	0.021 5	0.032 5	0.018 8	0.017 9	0.017 1
	Y_6	0.153 2	0.125 9	0.176 0	0.091 1	0.081 2	0.073 6

(三)环境与产业优先情景参数设置及说明

假定在环境优先情景中,产业子系统中各指标年均变化率和基准情景保持一致。而在产业优先情景中,环境子系统中各指标年均变化率和基准情景保持一致(见表5)。

表 5　环境与产业子系统序参量较基准情景变化率

单位:%

地区	指标	2026 年	2030 年	2035 年	2040 年	2045 年	2050 年
上游	X_2	+2.5	+2.5	+3.0	+3.5	+3.5	+3.5
	X_3	+0.8	+0.8	+1.0	+1.2	+1.2	+1.2
	X_4	+0.6	+0.6	+0.8	+1.0	+1.0	+1.0
	X_8	+0.2	+0.2	−2.5	−4.0	−4.0	−4.0
	X_9	−0.8	−0.8	−2.2	−3.5	−3.5	−3.5
	X_{10}	−1.5	−1.5	−2.5	−3.5	−3.5	−3.5
	X_{11}	−1.2	−1.2	−2.5	−4.0	−4.0	−4.0
	Y_1	−0.8	−0.8	−1.0	−1.2	−1.2	−1.2
	Y_3	+5.5	+5.5	+7.5	+6.5	+6.5	+6.5
	Y_4	+2.5	+2.5	+2.0	+1.5	+1.5	+1.5
	Y_5	+1.0	+1.0	+1.8	+2.5	+2.5	+2.5
	Y_6	+0.8	+0.8	+0.6	+2.5	+2.5	+2.5
中游	X_2	+1.2	+1.2	+1.6	+2.0	+2.0	+2.0
	X_3	+0.5	+0.5	+0.6	+0.7	+0.7	+0.7
	X_4	+0.4	+0.4	+0.5	+0.6	+0.6	+0.6
	X_8	+0.8	+0.8	−1.8	−3.2	−3.2	−3.2
	X_9	+0.3	+0.3	−1.2	−2.5	−2.5	−2.5
	X_{10}	−0.8	−0.8	−1.5	−2.2	−2.2	−2.2
	X_{11}	−0.8	−0.8	−1.8	−3.0	−3.0	−3.0
	Y_1	−1.5	−1.5	−1.8	−2.0	−2.0	−2.0
	Y_3	+4.2	+4.2	+6.0	+5.2	+5.2	+5.2
	Y_4	+4.2	+4.2	+3.5	+2.8	+2.8	+2.8
	Y_5	+1.8	+1.8	+2.8	+3.5	+3.5	+3.5
	Y_6	+1.8	+1.8	+1.2	+4.5	+4.5	+4.5
下游	X_2	+0.5	+0.5	+0.8	+1.2	+1.2	+1.2
	X_3	+0.2	+0.2	+0.3	+0.4	+0.4	+0.4
	X_4	+0.2	+0.2	+0.3	+0.4	+0.4	+0.4
	X_8	+0.1	+0.1	−2.2	−3.8	−3.8	−3.8
	X_9	−0.5	−0.5	−1.8	−3.0	−3.0	−3.0
	X_{10}	−0.3	−0.3	−0.8	−1.2	−1.2	−1.2
	X_{11}	−0.3	−0.3	−1.0	−1.8	−1.8	−1.8
	Y_1	−1.0	−1.0	−1.2	−1.4	−1.4	−1.4
	Y_3	+3.0	+3.0	+4.8	+4.0	+4.0	+4.0
	Y_4	+5.0	+5.0	+4.2	+3.5	+3.5	+3.5
	Y_5	+2.2	+2.2	+3.2	+4.0	+4.0	+4.0
	Y_6	+2.2	+2.2	+1.5	+5.0	+5.0	+5.0

1. 环境保护子系统参数设置说明

环境状态的衡量指标主要包括水资源总量、森林覆盖率和建成区绿化面积覆盖率。①水资源总量(X_2)。《黄河水资源公报 2023》显示,黄河干流 11 个主要水文站和 17 条支流控制水文站的实测径流量与上年相比有增有减,流域平均降水量为 491.3 mm,较上年增长 5.5%。上游地区作为“中华水塔”,其径流系数与生态基流保障率均显著高于中下游,在《全国水资源保护规划(2016—2030)》确定的源头水源补给与生态屏障功能强化的背景下,未来短中长期变化率可预计为 +2.5%、+3.0%、+3.5%;黄河流域中游地区作为水资源配置关键通道,在“十四五”期间实施的大型灌区续建配套项目推动下,可设定短中长期年均变化率为 +1.2%、+1.6%、+2.0%;下游地区地下水超采治理与生态补水工程的边际效益递减,加之咸潮入侵等特有生态约束,通过优化引黄供水调度体系与生态补水机制或可保持水资源总量的韧性提升,故将短中长期年均变化率设定为 +0.5%、+0.8%、+1.2%。②森林覆盖率(X_3)。《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035 年)》提出,预计到 2030 年,森林覆盖率将达到 26% 左右,相较于 2021 年的 24.02%,年均变化率为 +0.88%。黄河上游在“宜林则林、宜草则草”原则指导下,通过系统实施水源涵养工程,预计短中长期年均变化率为 +0.8%、+1.0%、+1.2%,以强化其国家生态安全屏障功能;中游黄土高原以小流域为单元开展水土保持综合治理,针对多沙粗沙区实施精准治理,造林条件艰苦且管护成本高昂,设定其不同时期年均变化率为 +0.5%、+0.6%、+0.7%;下游地区在严守耕地红线前提下,重点推进黄河三角洲湿地保护与修复,且下游地区的冲积平原以基本农田保护为主,可供造林空间极为有限,根据国务院办公厅《关于坚决制止耕地“非农化”行为的通知》要求,可设定不同时期年均变化率为 +0.2%、+0.3%、+0.4%。③建成区绿化面积覆盖率(X_4)。根据国家统计局,截至 2023 年,31 个省(自治区、直辖市)以及新疆生产建设兵团已经全面覆盖了国家森林城市创建,城市建成区的绿化覆盖率 10 年间从 39.22% 增长到 42.69%,年均变化率约

+0.85%。上游地区依托生态本底优势,结合新城建设与生态移民搬迁释放的可绿化空间,可设定短中长期变化率为 +0.6%、+0.8%、+1.0%;中游地区面临黄土高原水土流失治理与工矿城市转型为双重挑战,在"公园城市"建设推动下,预计其年均变化率为 +0.4%、+0.5%、+0.6%;下游地区受城市高度建成、绿地趋于饱和的客观条件制约,在"城市双修"政策导向下绿地面积可能会有较低的增长,故设定不同时期年均变化率为 +0.2%、+0.3%、+0.4%。

环境压力的衡量指标主要包括工业二氧化碳排放量和单位 GDP 能耗。①工业二氧化碳排放量(X_8)。根据国家统计局,2010—2023 年黄河流域工业碳排放年均变化率约为 -1.33%。黄河上游承担重要生态屏障功能且工业化进程相对滞后,清洁能源禀赋优越,依托国家生态补偿与产业准入政策,可将各时期年均变化率设为 +0.2%、-2.5%、-4.0%;中游地区作为高碳产业集聚区,面临能源结构优化与技术创新双重压力,依据重点行业碳达峰行动方案的要求,年均变化率可分别设为 +0.8%、-1.8%、-3.2%;下游地区经济发达且技术密集型产业占比高,碳减排边际成本较低且市场机制完善,年均变化率可设为 +0.1%、-2.2%、-3.8%。②单位 GDP 能耗(X_9)。依据《"十四五"节能减排综合工作方案》,到 2025 年全国单位 GDP 能耗需较 2020 年下降 13.5%,年均变化率为 -2.86%。考虑到黄河上游地区依托清洁能源资源优势及产业后发优势,可优先布局风电、光伏等新能源项目,将其年均变化率分别设定为 -0.8%、-2.2%、-3.5%;中游地区作为传统高耗能产业集聚区,面临能源结构优化与技术改造的双重挑战,短中长期年均变化率分别为 +0.3%、-1.2%、-2.5%;下游地区经济发达、服务业占比高,能源管理体系完善且绿色技术应用广泛,年均变化率可分别设定为 -0.5%、-1.8%、-3.0%。

环境抗逆的衡量指标主要包括水土流失治理面积和工业污染治理完成投资额。①水土流失治理面积(X_{10})。《黄河蓝皮书—黄河水利与流域绿色发展报告》显示,截至 2023 年底,黄河流域水土流失面积为 25.11 万平方千米,比 2022 年减少 0.44 万平方千米,减幅 1.72%。黄河上游作为水土流失重点防治区,依托退耕还林还草等重点工程,短期较基准变化率设为 -1.5%,中长期分别设为 -2.5%、-3.5%;中游黄土高原沟壑区因治理难度递增及工程边际效应显现,可将各时期的年均变化率设为 -0.8%、-1.5%、-2.2%;下游冲积平原区水土流失本底较轻且治理空间有限,未来应巩固提升、积极预防,故设定各时期较基准的变化率分别为 -0.3%、-0.8%、-1.2%。②工业污染治理完成投资额(X_{12})。根据《黄河生态保护治理攻坚战行动方案》,到 2025 年,黄河流域需基本完成尾矿库污染治理,工业污染治理投资额将显著增加。黄河上游地区作为矿产资源开发区,历史遗留污染问题突出,尾矿库治理任务繁重,设定年均变化率分别为 -1.2%、-2.5%、-4.0%;中游地区作为传统工业集聚区,产业结构偏重,面临企业搬迁改造与污染治理的双重压力,设定其年均变化率为 -0.8%、-1.8%、-3.0%;下游地区工业布局相对优化,污染治理基础较好,故设定各时期年均变化率为 -0.3%、-1.0%、-1.8%。

2. 产业发展子系统参数设置说明

产业结构的衡量指标主要包括工业化率和产业结构高级化。①工业化率(Y_1)。根据国家统计局,2010—2023 年黄河流域工业化率持续下降,且随着经济结构向服务业转型,未来人均 GDP 增长将更多由非农产业共同驱动。黄河上游地区生态约束强、工业化基础薄弱,在清洁能源等绿色低碳产业带领下,工业化率将在上中下游流域以最缓的速率下降,可设定年均变化率为 -0.8%、-1.0%、-1.2%;中游地区作为传统工业核心区,面临产业升级与碳排放约束的双重压力,工业化率降幅最为明显,故设定年均变化率为 -1.5%、-1.8%、-2.0%;下游地区经济结构更优,服务业占比高,工业增速与人均 GDP 增速将同步放缓,两者差距

相对稳定,工业化率或呈稳步下降,可设定各时期年均变化率分 -1.0%、-1.2%、-1.4%。②产业结构高级化(Y_3)。根据"十五五"规划,黄河流域产业结构进一步优化,创新驱动发展战略优势逐步显现。但碍于环境容量的制约,其产业结构优化速度将逐渐减慢,高端产业比重显著提升但速度较缓。上游地区依托清洁能源优势与生态补偿机制,重点培育绿色低碳产业,设定年均变化率分别为 +5.5%、+7.5%、+6.5%;中游地区作为传统产业密集区,面临技术改造与链条延伸的双重任务,设定年均变化率为 +4.2%、+6.0%、+5.2%;下游地区服务业基础雄厚、科技创新要素集聚,设定年均变化率分别为 +3.0%、+4.8%、+4.0%。

产业集聚主要靠高新技术产业集聚水平来衡量(Y_4)。根据《黄河流域生态保护和高质量发展科技创新实施方案》,黄河流域将统筹提出支撑实现黄河流域生态保护和质量发展战略目标的科技创新行动和保障举措。上游地区依托能源资源优势与生态科技政策倾斜,聚焦新能源、生态科技等领域,设定年均变化率为 +2.5%、+2.0%、+1.5%;中游地区凭借产业基础与区位优势,承接东部技术转移,设定年均变化率为 +4.2%、+3.5%、+2.8%;下游地区依托人才资本优势与完善创新生态,设定年均变化率为 +5.0%、+4.2%、+3.5%。

产业竞争力主要靠 R&D 经费投入强度、技术市场成交额来衡量。①R&D 经费投入强度(Y_5)。根据《统筹推进黄河流域工业高质量发展》,黄河流域主要省份的研发经费投入规模仍待加强。考虑到黄河流域高质量发展对提升科技创新能力的需求以及中国"十四五"时期"全社会研发经费投入年均增长 7% 以上"的指引性目标。黄河上游地区依托能源资源优势与生态科技政策支持,聚焦清洁能源、生态治理等特色领域,设定短中长期年均变化率分别为 +1.0%、+1.8%、+2.5%;中游地区凭借产业基础优势与制造业转型升级需求,设定年均变化率为 +1.8%、+2.8%、+3.5%;下游地区依托人才资本集聚优势与完善创新生态,设定年均变化率为 +2.2%、+3.2%、+4.0%。②技术市场成交额(Y_6)。根据国家统计局,2023 年黄河流域 9 省(区)技术合同成交额约 1.28 万亿元,相比于 2020 年的 0.56 万亿元,整体呈现较快增长态势,年均增长率约为 31.7%。鉴于黄河流域技术合同成交额整体已处于较快增长阶段,各情景下增长率的调整幅度相对有限,主要体现为不同区域在既有增长趋势基础上的边际差异。因此,上游地区依托特色领域技术创新与政策引导,聚焦生态治理、清洁能源等技术交易,在基准增长水平上分别设定稳定的年均增长率为 +0.8%、+0.6%、+2.5%;中游地区凭借产业基础与技术改造需求,设定 +1.8%、+1.2%、+4.5% 的年均增长率;下游地区依托完善创新生态与高水平科研机构,但为凸显其"源头供给、高效转化"的市场引领作用,设定年均变化率为 +2.2%、+1.5%、+5.0%。

(四)权重确定

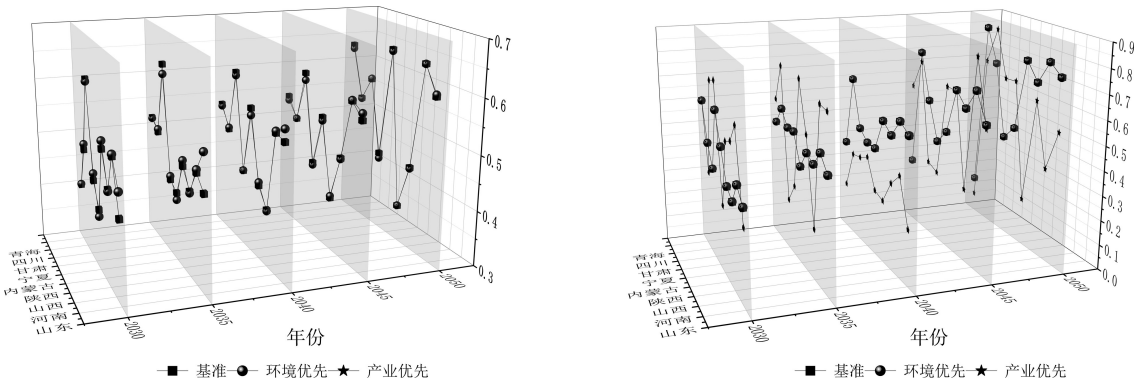
参考罗巍等[33]、吴林娟等[35]的做法,本文采用主客观相结合的方法确定指标权重。首先,运用相关矩阵赋权法,计算各指标与所有指标的相关系数,并以相关系数绝对值之和表征指标的"系统影响力",单个指标"系统影响力"与全部指标"系统影响力之和"的比作为指标的客观权重;其次,采用判别矩阵分析法进行主观赋权,邀请 7 位专家按照少数服从多数原则对指标两两比较评分。专家组由 2 位从事可持续发展研究的教授(博士生导师)、2 位从事区域战略研究的副教授(硕士生导师)以及 3 位来自生态环境、区域发展与产业发展等领域的政府部门专业人员(均具有硕士学位)构成。指标两两比较时,"更重要""同样重要""不重要"分别赋值"2""1""0",并以各指标评分占全部指标评分总和的比作为主观权重;最后,取主客观权重的均值,确定各情景下环境与产业子系统指标综合权重(见表 1)。

四、结果分析

(一)子系统有序度

不同情景下黄河流域环境与产业子系统呈

“生态优先则产业受限、产业优先则环境超载”的二元悖论(见图3)。具体来看,环境子系统在3种情景下虽能维持较高的有序度水平,但其波动幅度随时间推移明显加剧。相比之下,产业子系统在基准与环境优先情景下有序度较为平稳,在产业优先情景中波动明显增强且与其他两种情景的差距逐步拉大。这说明任何单一导向的发展路径均存在一定风险,过度追求经济增长易导致环境承载阈值突破,而过度侧重生态保护则可能制约产业的有序发展。



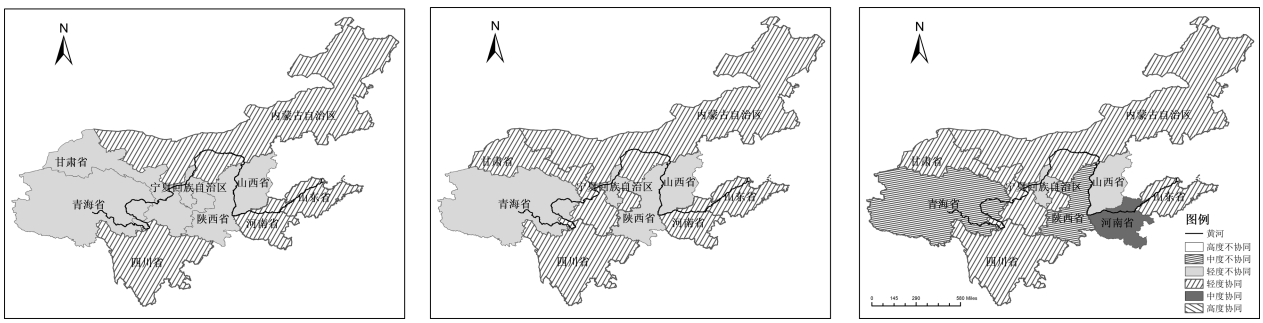
a. 环境子系统　　b. 产业子系统

图3　黄河流域重点年份环境与产业子系统有序度

(二)复合系统协同度

1. 基准情景

在基准情景下,黄河流域环境与产业协同呈“结构性失衡”特征(见图4),这种空间分异特征反映出区域发展阶段与生态约束强度之间存在一定错位。上游宁夏、内蒙古等地区长期依赖资源开发且生态退化加剧,其协同发展明显受到生态红线约束;中游传统能源基地转型压力较大,在经济增长与生态保护之间处于权衡状态;下游地区则承受人口和经济高度集聚带来的生态空间挤压,其产业升级更多是对水资源等外部约束趋紧的被动响应,而非源于内在的绿色创新驱动。部分省份的协同演变进一步印证了这一格局,青海和陕西长期处于不协同状态,这可能源于两省在发展路径上的显著差异:青海将限制大规模工业开发、控制城镇扩张、划定生态红线等作为生态保护的核心手段,而陕西则仍存在一定程度的传统发展路径依赖;相比之下,河南处于轻度至中度协同阶段,能够在推动经济发展的同时实现一定程度的绿色转型,但依然面临较为突出的资源环境约束。



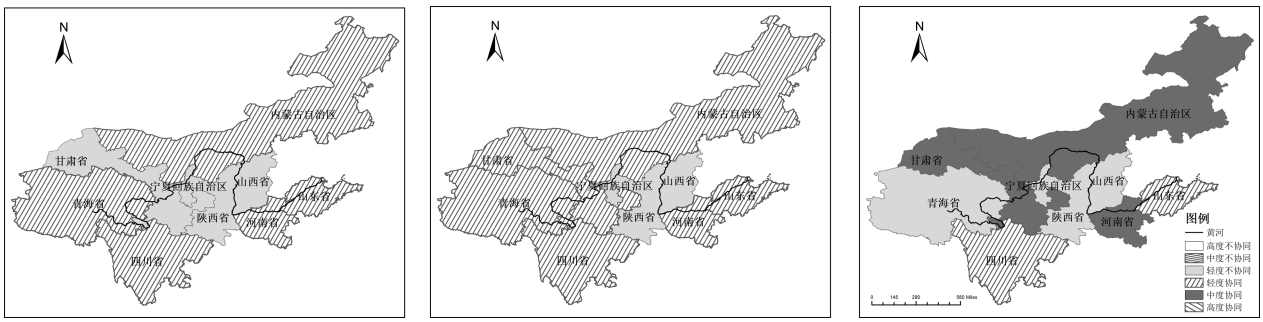
a. 2030年　　b. 2035年　　c. 2050年

图4　基准情景下黄河流域代表年份环境与产业协同水平

2. 环境优先情景

环境优先情景下,黄河流域环境与产业协同呈“阶段性优化”特征(见图5)。与基准情景的“结构性失衡”不同,该情景下严格的生态约束在

一定程度上倒逼产业绿色转型,使上中下游协同水平 2030—2050 年整体呈现提升态势。各省份协同水平表现出较为显著的梯度差异,青海、宁夏等上游省份协同水平并无明显优化,反映出资源型地区绿色转型的深层约束。甘肃、河南、内蒙古仅达到中度协同水平,说明仅依靠既有的产业结构调整,而不从根本上培育强大的绿色新兴产业集群与生态价值转化机制,难以真正突破协同瓶颈。

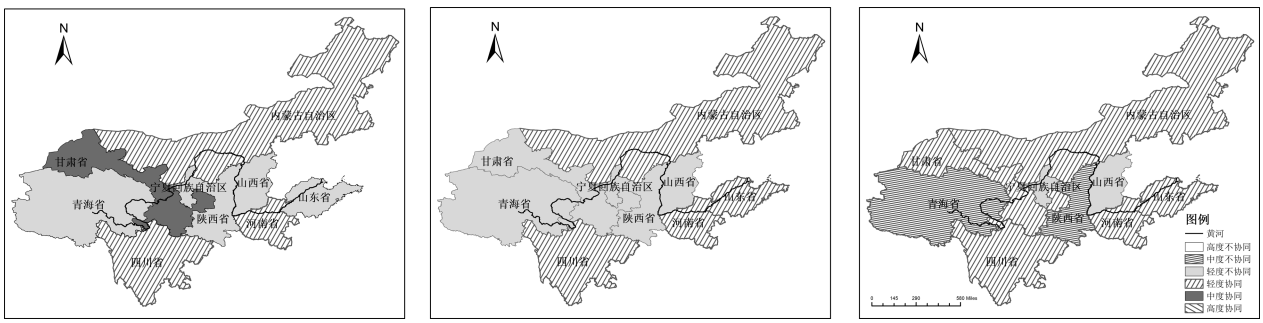


a. 2030 年　　b. 2035 年　　c. 2050 年

图 5　环境优先情景下黄河流域代表年份环境与产业协同水平

3. 产业优先情景

产业优先情景下,黄河流域环境与产业协同呈“产业超载锁定”特征(见图 6),这种格局源于上游重点生态功能区与有色金属、氯碱化工产业布局之间的矛盾,中游农产品主产区与煤炭油气开采并存,以及下游以城市化区域和传统产业集聚为主的空间格局与旧动能产业布局不匹配等问题。在以经济增长速度为主导的发展路径下,流域产业发展仍存在较为显著的倚能倚重、低质低效问题,且缺乏具有较强竞争力的新兴产业支撑,导致流域整体协同状态逐步演变为严重的不均衡格局。从省份协同来看,甘肃、青海、陕西三省协同水平明显下降,印证了以经济增长为导向的发展路径更加依赖传统产业,忽视了产业的绿色转型和升级,易引发资源过度开发和污染集中等问题,从而超出环境承载能力。



a. 2030 年　　b. 2035 年　　c. 2050 年

图 6　产业优先情景下黄河流域代表年份环境与产业协同水平

五、结论、政策建议与讨论

在深入剖析黄河流域环境与产业复合系统理论框架后,本文基于黄河流域高质量发展战略愿景,设定了基准、环境优先及产业优先三大情景,模拟并分析了多情景下环境与产业的潜在协同水平。研究发现:①黄河流域环境与产业子系统呈“生态优先则产业受限、产业优先则环境超载”的二元悖论;②基准情景下黄河流域整体呈现“结构性失衡”特征。上中下游分别出现“生态—资源”循环困境、转型平衡难题和内部驱动不足等问题,各省的协同趋势也深刻反映了其在区域格局中的结构性困境;环境优先情景下协同度呈“阶段性优

化”特征。上中下游地区在生态硬约束下协同水平系统提升,上游资源型省份转型艰难,而其他省份的协同提升则因绿色产业缺失而面临瓶颈,导致协同水平呈明显梯度差异;产业优先情景下黄河流域协同呈“产业超载锁定”特征。上中下游的产业布局与生态功能严重错配,倚能倚重的路径依赖导致流域协同度严重分化与恶化,甘肃、青海等省份协同水平显著衰减。

上述研究结果表明,相较于其他情景,环境优先情景在保障黄河流域生态保护和高质量发展方面表现较为突出,但仍存在环境与产业协同水平提升不均等问题。同时,参考张文彬等[36]借助地理探测器分析该情景下黄河流域环境与产业协同的驱动因子,发现核心驱动因子在时序上经历了由水资源总量到工业废水排放量、单位 GDP 能耗,再到水资源总量、工业污染治理完成投资额的演变过程。另外,协同的空间分异不仅是单因子作用的结果,更受到多因子交互作用的显著影响,且交互解释力普遍高于单因子作用。如以水资源、单位 GDP 能耗等基础要素交互为主,逐步演变为水资源持续发挥支撑作用,并与科技创新系统深度融合的长期格局。鉴于以上分析,提出如下政策建议。①实施分区精准调控。在生态脆弱区严格执行产业准入与生态补偿,在发展区设定环境效率门槛,以破解“生态优先则产业受限、产业优先则环境超载”的二元悖论。②基于区域功能定位推动定向扶持。设立“流域协同发展基金”,重点投资于转型困难省份的绿色产业升级与生态治理项目。同时,向上游地区倾斜投入污染治理、生态修复等关键技术,培育上游特色生态产业,破解其“保护即停滞”的发展困境。③制定动态政策体系。短期内强化水资源管理,投资节水基础设施;中期聚焦能耗与碳排放强度管控,推动能效革命;长期则须保持战略定力,着力构建产学研深度融合的创新生态系统,以此驱动技术范式的根本性转型。④建立跨区域协同与第三方评估制度。借鉴“河长制”经验,推动建立下游受益区与上游保护区结对发展的“生态邻居”机制,共同制定产业准入清单与补偿标准。引入第三方机构开展流域协同发展年度评估,结果作为财政转移支付与项目审批的重要依据,形成促进全流域协同共进的外部推力。

黄河流域环境与产业的复杂协同关系,进一步揭示了区域可持续发展中的深层次矛盾:生态安全与经济发展之间的张力并非简单的取舍关系,而是具有时空动态性的系统性问题。这要求建立时空差异化的政策体系,实现从单点管控向系统协同的治理范式转变。未来研究可进一步细化情景模拟中政策参数的动态设定,增加政策变量,如补贴、税率等与实时环境数据、经济指标挂钩,并随阶段目标实现程度自动调整,以模拟政策的自适应与精准化调控过程。

参考文献:

[1]崔鑫生, 韩萌, 方志. 动态演进的倒“U”型环境库兹涅茨曲线[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(9): 74-82.

[2]马青, 傅强. 产业绿色转型与污染溢出:基于环境库兹涅茨曲线的时空检验[J]. 统计与决策, 2022, 38(12): 43-48.

[3]ZHANG T, ZHAO F. A study on the relationships among green finance, environmental pollution and economic development [J]. Energy strategy reviews, 2024, 51(1): 101290.

[4]章杰宽. 旅游与碳排放:全球视角与区域比较[J]. 地理研究, 2022, 41(11): 3088-3104.

[5] LI R, WANG Q, GUO J. Revisiting the Environmental Kuznets Curve (EKC) hypothesis of carbon emissions: exploring the impact of geopolitical risks, natural resource rents, corrupt governance, and energy intensity[J]. Journal of environmental management, 2024, 351: 119663.

[6]李小明, 刘雅迪, 汪婵, 等. 破解环境规制的“增长困局”:数字经济的对冲效应[J]. 经济学动态, 2025 (9): 19-38.

[7]张勇, 孙婷婷. 政府环境关注度如何促进绿色金融发展:来自微观企业绿色信贷融资的经验证据[J]. 经济与管理评论, 2025, 41(6): 135-147.

[8]李维安, 李鼎, 周宁. 环境规制与企业绿色治理机会主义行为:基于 ESG 框架的分析[J]. 经济管理, 2025, 47(1): 5-23.

[9]成金华，彭昕杰，李静远，等．环境规制对长江经济带经济高质量发展影响的传导机制[J]．中国人口·资源与环境，2024，34(5)：126-136.
[10]李雪松，杨泉，周敏．市场型环境规制、碳减排与企业环境绩效：来自中国碳市场的证据[J]．中国软科学，2024 (8)：200-210.
[11]王健龙，王伟龙，刘勇．绿色金融政策何以驱动中国城市能源转型？[J]．经济与管理研究，2025，46(11)：91-109.
[12]王杰，王博瀚．碳减排政策的就业效应：来自碳交易试点的经验证据[J]．中国软科学，2024 (6)：156-164.
[13]包国宪，关斌．财政压力会降低地方政府环境治理效率吗：一个被调节的中介模型[J]．中国人口·资源与环境，2019，29(4)：38-48.
[14]哈梅芳，隋明强，黄奕晗，等．黄河流域绿色协同发展及其障碍因子研究[J]．人民黄河，2025，47(11)：20-27.
[15]刘琳轲，梁流涛，高攀，等．黄河流域生态保护与高质量发展的耦合关系及交互响应[J]．自然资源学报，2021，36(1)：176-195.
[16]张哲菲，李国平．经济—能源—环境系统耦合的动态演化规律与空间溢出效应研究[J]．经济问题探索，2025 (3)：49-67.
[17]邬彩霞．中国低碳经济发展的协同效应研究[J]．管理世界，2021，37(8)：105-117.
[18]蔡超岳，唐健雄，李志远．黄河流域旅游业发展与生态文明建设的协同演化研究[J]．自然资源学报，2025，40(11)：3048-3072.
[19] HAKEN H. Synergetics：introduction and advanced topics[M]. Berlin：Springer，2004：24-45.
[20]刘晓丹，孙英兰．“生态环境”内涵界定探讨[J]．生态学杂志，2006 (6)：722-724.
[21]蓝楠．协同治理视角下黄河流域综合治理机制研究[J]．中国软科学，2024 (12)：196-204.
[22]薛伟贤，石涵予．黄河流域环境保护与产业协同发展研究[M]．北京：经济科学出版社，2024：148-197.
[23]张扬，师海猛．黄河流域城镇化高质量发展与生态环境耦合协调度评价[J]．统计与决策，2022，38(10)：71-75.
[24]杨永芳，王秦．新时代中国区域经济高质量发展评价指标体系构建研究[C]//中国软科学研究会 2023 年中国软科学论文集．北京：北京联合大学，2024：183-191.
[25]史利江，李永宁，李前锦，等．资源型地区地级市绿色发展水平的时空演变及影响因素：以山西省为例[J]．经济地理，2024，44(1)：77-87.
[26]陈景华，陈姚，陈敏敏．中国经济高质量发展水平、区域差异及分布动态演进[J]．数量经济技术经济研究，2020，37(12)：108-126.
[27]干春晖，郑若谷，余典范．中国产业结构变迁对经济增长和波动的影响[J]．经济研究，2011，46(5)：4-16.
[28]王国红，邢蕊，唐丽艳．区域产业集成创新系统的协同演化研究[J]．科学学与科学技术管理，2012，33(2)：74-81.
[29] SUTHERLAND W J，BROAD S，CAINE J，et al. A horizon scan of global conservation issues for 2016[J]. Trends in ecology & evolution，2016，31(1)：44-53.
[30]崔盼盼，赵媛，夏四友，等．黄河流域生态环境与高质量发展测度及时空耦合特征[J]．经济地理，2020，40(5)：49-57.
[31]娄伟．情景分析理论研究[J]．未来与发展，2013，36(8)：30-37.
[32]孟庆松，韩文秀．复合系统协调度模型研究[J]．天津大学学报，2000 (4)：444-446.
[33]罗巍，杨玄酯，杨永芳，等．黄河流域水—能源—粮食纽带关系协同演化及预测[J]．资源科学，2022，44(3)：608-619.
[34] AL-LAMI A，TRK Á. Regional forecasting of driving forces of CO_2 emissions of transportation in Central Europe：an ARIMA-based approach[J]. Energy reports，2025，13(6)：1215-1224.
[35]吴林娟，赵国俊．基于结构 CRITIC 法的学术期刊评价指标的赋权方法及比较[J]．统计与决策，2024，40(1)：56-62.
[36]张文彬，相晨寒．黄河流域生态保护与经济高质量发展协同演化及驱动因素研究[J]．地理科学，2025，45(8)：1710-1719.