黄河流域生态效率评价

李芸蓉，李梦欣

（西安财经大学经济学院，西安 710000）

摘要： 黄河流域横贯中国的东、中、西部地区，在中国生态安全和经济社会发展中具有重要地位。基于 2013—2023 年黄河流域地级市面板数据，构建生态效率评价指标体系，采用超效率 SBM 模型测度生态效率，并运用 Tobit 回归模型分析其影响因素。结果表明：黄河流域生态效率整体呈稳步上升趋势，但区域差异显著，呈现“上游高、中游居中、下游低”的空间格局；经济发展水平、科技创新与财政规模对生态效率具有显著正向影响，而对外开放则表现为显著的负面效应。基于此，从分区治理、绿色创新、环境准入与协同机制等方面提出提升黄河流域生态效率的路径建议。

关键词： 黄河流域；生态效率；超效率 SBM 模型；Tobit 模型

中图分类号： F062.2 **文献标志码：** A **文章编号：** 1671－1807(2026)13－0194－08

黄河流域是中国重要的生态屏障和经济发展区域，承载着全国重要的能源、农业和工业功能。然而，长期以来，由于资源过度开发、产业结构偏重以及生态环境脆弱，黄河流域面临水资源短缺、污染排放集中、生态系统退化等严峻挑战。2019 年，“黄河流域生态保护和高质量发展”被确立为重大国家战略，标志着黄河流域进入生态优先、绿色发展的新阶段。在此背景下，科学评价黄河流域生态效率，揭示其时空演变特征与影响因素，对于推动流域绿色转型和区域协调发展具有重要的理论与实践意义。基于城市视角测度黄河流域生态效率，并探究其影响因素，以期为黄河流域生态保护和高质量发展提供决策参考。

1 文献综述

生态效率最早由德国学者 Schaltegger 和 Sturm[1]于 1990 年提出，指经济增长与环境影响的比值。1992 年，其理论框架由世界可持续发展工商委员会(WBCSD)提出，该指标可从产品、企业、行业等多维度量化分析。此后，学术界对生态经济效率的理论和实证研究不断探索并深化拓展，主要分为两个方面：①生态效率测度方法。主要采用比值法、指标体系法、模型法等对生态效率进行测度。比值法作为最直接体现生态效率核心理念的方法，通常以单位环境压力的经济产出或单位经济产出的环境负荷等形式呈现，因其计算简便、意义明确而被广泛应用于宏观层面的国际比较研究[2]。然而，该方法难以同时兼顾多投入多产出的复杂现实，存在视角单一的局限性。为克服此缺陷，指标体系法应运而生[3]，它通过构建包含经济、资源、环境等多维度的综合指数来全面评估生态效率。这类方法虽提升了评价的全面性，但各指标的权重确定常带有主观性，且难以揭示投入与产出之间的内在转化效率。在此背景下，基于前沿分析思想的模型法，特别是数据包络分析(data envelopment analysis，DEA)及其衍生模型，逐渐成为生态效率测度研究的主流工具[4]。DEA 方法无需预设生产函数形式，能有效处理多投入多产出系统，并直接测算出决策单元的相对效率。早期的研究多采用传统 DEA 模型，但无法充分考虑生产过程中伴随的非期望产出。为此，Tone[5]提出了非期望产出 SBM (slacks-based measure)模型，使效率评估更贴合可持续发展内涵。近年来，为进一步区分有效决策单元之间的效率差异并考察不同群组的技术异质性，超效率 DEA 与共同前沿分析等先进模型被广泛采用，推动了生态效率测度方法向更精准、更深入的方向发展。在黄河流域的相关研究中，学者们正是利用非期望产出超效率 SBM 模型[6]，有效揭示了流域内各省生态效率的时空分异特征及其提升潜力。②生态效率影响因素研究。学者们从多维度构建了影响因素分析框架。经济发展水平[7]、产业结构[8]、技术进步[9]、能源强度[10]、环境规制[11]、数字经济[12]、新质生产力[13]等被普遍认为是核心解

收稿日期： 2026-01-20

作者简介： 李芸蓉(2001—)，女，宁夏中卫人，硕士研究生，研究方向为产业经济学；通信作者李梦欣(1993—)，女，陕西西安人，博士，讲师，研究方向为经济增长质量。

释变量。

随着黄河流域生态保护和高质量发展上升为重大国家战略,其生态问题近年来已成为国内学术界关注的焦点,现有关于黄河流域生态研究主要从理论和实证两个方面展开。在理论研究层面,金凤君等[14]从黄河流域产业发展与生态环境的两大矛盾出发,提出流域产业绿色转型需要解决的科学问题,提出产业绿色转型发展研究需要人文与自然的学科交叉融合、技术与管理模式的有效结合;史歌[15]提出构建以生态产品价值实现为主线的生态补偿机制;刘婷和杨红伟[16]提出新质生产力理论通过技术创新、生产要素重组、制度变革与管理优化,为流域治理提供了系统性解决方案;薛婕等[17]研究发现黄河流域存在水资源短缺、生态系统脆弱、生态环境风险高等问题,提出柔性科技治理机制。在实证研究层面,杨玉春和岳立[18]利用 SBM 模型测算黄河流域全要素生态效率,研究发现生态效率呈先降后升的变化趋势,空间上呈“上下游高、中游低”的分布格局;沙德春和王茂林[19]构建了黄河流域高质量发展效率的“生态-经济-创新”三维分析框架,采用 Malmquist 指数法分析黄河流域高质量发展效率的演变趋势;陈明华等[20]构建了非期望产出 SBM 模型,研究生态效率的内在增长潜力和外部驱动因素,寻求生态效率提升路径。

从已有文献来看,对于黄河流域生态效率的研究仍有进一步发展的空间。一方面,现有研究多采用传统 DEA 或 SBM 模型,对超效率 SBM 模型的应用尚不充分,难以有效区分高效单元之间的差异;另一方面,影响因素分析多集中于单一维度,缺乏对经济、社会、环境等多维因素的系统整合。尽管已有学者如徐峰等[6]运用超效率 SBM 模型对黄河流域生态效率进行了测度,杨玉春和岳立[18]也基于 SBM 模型分析了流域全要素生态效率的时空特征,但相较于上述研究,本文的研究在以下方面形成了有益补充:①研究尺度下沉至地级市层面,更加细致地揭示了城市间的效率差异与空间格局;②构建了涵盖经济发展、产业结构、科技创新、财政规模、对外开放与城镇化水平的多维影响因素分析框架,系统考查各因素对生态效率的综合作用。

值得说明的是,本文的研究与杨玉春和岳立[18]在结论上存在一定差异。杨玉春和岳立研究发现黄河流域生态效率呈现“上下游高、中游低”的分布格局。这一差异可能来源于以下几方面:①研究时间跨度不同,本文中涵盖 2013—2023 年,生态效率的空间格局可能随时间发生动态演变;②研究尺度不同,本文中聚焦地级市层面,尺度差异可能导致空间分布特征的不同;③本文在超效率 SBM 模型的基础上进一步区分了高效单元之间的效率差异,使得对上中下游城市生态效率的刻画更为精准。综上,本文方法与结论均对现有研究形成了重要补充。

2 理论基础

2.1 生态效率理论

生态效率理论是连接经济活动与生态环境压力的桥梁,其核心思想在于追求以最少的资源消耗和环境代价,获取最大的经济价值。20 世纪 90 年代初,德国学者 Schaltegger 和 Sturm[1]首次明确提出了“生态效率”概念,旨在描述经济活动与生态环境压力之间的平衡关系。这一理念随后由世界可持续发展工商理事会系统化,并将其定义为通过提供具有价格竞争力的商品与服务,在满足人类需求、提高生活质量的同时,将整个生命周期的生态影响与资源强度降至与地球承载力相协调的水平。该定义深刻揭示了生态效率的核心内涵,即追求经济价值创造与资源环境消耗的“脱钩”。这种“脱钩”不仅包括经济增长速率快于环境压力增长的“相对脱钩”,更是追求在经济持续发展时环境压力总量稳定甚至下降的“绝对脱钩”,后者是高质量发展的关键特征。从方法论角度看,生态效率的数学本质是一个效率比值,即经济价值增加值与环境影响增加值的比率。这一比率思想直接催生了从简单的单一比值法,到综合的指标体系法,再到基于生产前沿面的模型法等一系列测度方法的发展。超效率 SBM 模型正是这一理论脉络的高级体现,它能够在多投入、多期望产出并同时包含非期望产出的复杂系统中,精确测算各决策单元与最优效率边界的距离,从而在方法论层面完整体现了生态效率的核心理念。

2.2 可持续发展理论

可持续发展理论将经济系统、社会系统与环境系统视为一个统一的、相互依存的整体,强调必须通过有效的治理与协调,约束各系统的行为限度,以达成一种长期的、动态的平衡发展状态。该理论由 1987 年联合国《我们共同的未来》报告经典定义,强调“既满足当代人的需求,又不损害后代人满足其自身需求的能力的发展”,这一表述蕴含了深刻的代际公平思想,将发展的维度从当下拓展至未来。可持续发展的概念框架通常被解构为经济、社会与环境 3 个相互依存、相互制约的维度,构成一个不可分割的“三维一体”系统。经济可持续性要求保持资本存量和生

产力的稳定增长，社会可持续性追求社会公平、福祉提升与文化传承，环境可持续性则强调维持生态系统的完整性与服务功能。构建包含资本、劳动、资源投入，经济与社会期望产出，以及环境非期望产出的指标体系，是对可持续发展三维目标的具体承接与整合。对黄河流域生态效率的测度与提升路径的探索，其最终目标正是为了推动流域内经济活力、社会公平与生态健康的协同共进，从而实现真正意义上的、面向未来的可持续发展。

3　研究方法与数据来源

3.1　研究区域

遵循“以自然流域为基础、区划完整性、社会经济直接关联性”3 条原则，考虑到四川已被纳入长江经济带，以《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》为指导，确定青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东 8 省份为研究区域。此外，因内蒙古、青海、甘肃、河南的部分自治州（盟）或副地级城市数据缺失，将这些城市剔除，最终确定 68 个城市①。

3.2　研究方法

3.2.1　超效率 SBM 模型

利用超效率 SBM 模型来衡量黄河流域生态效率。该模型在考虑非期望产出时，可以有效避免传统 SBM 模型中效率为 1 的情况，具体步骤如下：

$$\min\rho=\frac{1+\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\frac{s_i^-}{x_{ik}}}{1-\frac{1}{q_1+q_2}\left(\sum_{r=1}^{q_1}\frac{s_r^+}{y_{rk}}+\sum_{t=1}^{q_2}\frac{s_t^{b-}}{b_{tk}}\right)},$$

$$\text{s.t}\begin{cases}\sum_{j=1,j\neq k}^{n}x_{ij}\lambda_j-s_i^-\leqslant x_{ik}\\ \sum_{j=1,j\neq k}^{n}y_{rj}\lambda_j+s_r^-\geqslant y_{rk}\\ \sum_{j=1,j\neq k}^{n}b_{ij}\lambda_j-s_t^{b-}\leqslant b_{tk}\\ 1-\frac{1}{q_1+q_2}\left(\frac{\sum_{r=1}^{q_1}s_r^+}{y_{rk}}+\frac{\sum_{t=1}^{q_2}s_t^{b-}}{b_{tk}}\right)>0\\ \lambda_j\geqslant 0,s_i^-\geqslant 0,s_r^+\geqslant 0,s_t^{b-}\geqslant 0\\ i=1,2,\cdots,m;r=1,2,\cdots,q_1;\\ t=1,2,\cdots,q_2;j=1,2,\cdots,n(j\neq k)\end{cases}\tag{1}$$

式中：ρ 为黄河流域各地区生态效率；x_{ik}、y_{rk}、b_{tk} 分别为决策单元的投入项、期望产出项、非期望产出项；s_i^-、s_r^+、s_t^{b-} 分别为投入、期望产出、非期望产出的松弛；λ 为权重。

3.2.2　Tobit 回归模型

由于生态效率值均大于 0，属于受限因变量，采用普通最小二乘法会造成偏误，而 Tobit 模型可以很好地解决该问题，故采用面板 Tobit 模型，其基本形式如下：

$$y=\begin{cases}y^*=\beta x_i+\varepsilon, & y>0\\ 0, & y\leqslant 0\end{cases}\tag{2}$$

式中：y 为受限因变量；x_i 为自变量；β 为回归系数；ε 为扰动项。

3.3　指标体系构建

基于上文理论阐述，结合既有研究[21-22]，遵循数据可获得性、科学性、系统性原则，构建黄河流域生态效率指标体系（表 1）。

表 1　黄河流域生态效率指标体系

类别	一级指标	二级指标	单位
投入指标	资本投入	全社会固定资产投资	万元
	劳动投入	从业人数	万人
	资源投入	城市建设用地面积	km^2
		供水总量	万 t
		全社会用电量	万吨标准煤
期望产出指标	生产收入	GDP	亿元
	地方收入	地方财政预算收入	万元
	环境效益	绿地面积	hm^2
		污水处理厂集中处理率	%
非期望产出指标	环境负产出	工业废水排放量	万 t
		工业烟尘排放量	t
		工业二氧化硫排放量	t

3.4　数据来源

选取 2013—2023 年黄河流域各城市的相关数据对生态效率进行测算，所有原始数据来源于《中国城市统计年鉴》以及黄河流域各省份、城市的统计年鉴，其中部分缺失数据用插值法补齐。

4　研究结果

4.1　黄河流域生态效率测算结果

采用 MATLAB 软件运行非期望产出的超效率 SBM 模型，测算 2013—2023 年黄河流域 68 个城市的生态效率，其均值变化趋势及区域差异如图 1 所示。从黄河流域生态效率的整体趋势来看，

①山西：太原、大同、阳泉、长治、晋城、朔州、晋中、运城、忻州、临汾、吕梁；内蒙古：呼和浩特、包头、乌海、鄂尔多斯、巴彦淖尔、乌兰察布；山东：济南、青岛、淄博、枣庄、东营、烟台、潍坊、济宁、泰安、威海、日照、临沂、德州、滨州、菏泽；河南：郑州、开封、洛阳、平顶山、鹤壁、新乡、焦作、濮阳、许昌、漯河、三门峡、商丘、周口市；陕西：西安、铜川、宝鸡、咸阳、渭南、延安、榆林、商洛；甘肃：兰州、白银、天水、武威、平凉、庆阳、定西、陇南；青海：西宁；宁夏：银川、石嘴山、吴忠、固原、中卫。

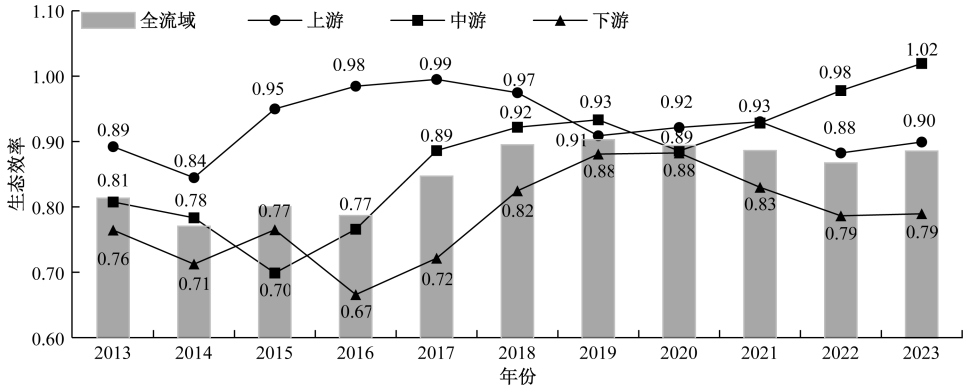


图 1　2013—2023 年黄河流域整体及上、中、下游生态效率变化趋势

2013—2023 年,全流域的生态效率在波动中呈现出稳步上升的态势。这表明流域内各城市在协调经济发展与生态环境保护方面取得了初步成效。这一积极变化在很大程度上得益于“黄河流域生态保护和高质量发展”这一国家重大战略的提出和实施。自该战略上升为国家战略以来,各级政府在污染治理、水资源节约集约利用、产业结构绿色转型等方面加强了顶层设计与协同行动。通过设定严格的生态红线,加大对高耗能、高污染产业的调整力度,并大力推动绿色技术创新与应用,使得流域整体在保持经济稳定发展的同时,环境负荷得到有效控制,从而共同推动了生态效率的波动上升趋势。

然而,流域内部存在显著的地区差异。具体表现为“上游高、中游居中,下游低”的梯度格局(表 2)。黄河上游地区的生态效率最高,均值为 0.926,中游地区次之,而经济最为发达的下游地区生态效率反而最低。这种空间分布格局与各省份的经济基础、资源禀赋和政策导向密切相关。上游省份如宁夏、内蒙古、甘肃,其经济结构中农业、牧业和生态旅游业占比较高,工业化与城市化带来的环境压力相对较小,加之国家生态补偿等政策支持力度大,因此生态效率表现优异。中游地区如陕西、山西,作为国家传统能源基地,煤炭开采、电力生产和重化工业占比较高,资源消耗与污染排放压力较大,但近年来在能源产业绿色转型、矿山生态修复、水土流失治理等方面持续发力,生态效率水平居中,呈现出转型发展的阶段性特征。反观下游的山东、河南,虽然经济总量大,但传统重工业和制造业占比较高,能源消耗与污染排放强度大,在经济增长的路径依赖下,绿色转型面临更大挑战,导致其生态效率偏低。特别值得注意的是青海省,尽管地处上游,但其生态效率远低于其他地区,这很可能与其脆弱的高原生态环境、相对落后的治理技术以及经济发展对资源开发的过度依赖有关。

表 2　2013—2023 年黄河流域各省份生态经济效率变化情况

省份	生态效率	排序
宁夏	0.973 6	1
内蒙古	0.965 8	2
甘肃	0.940 0	3
陕西	0.930 5	4
山西	0.831 9	5
山东	0.817 7	6
河南	0.747 7	7
青海	0.332 9	8

从城市层面分析,生态效率均值前 10 的城市分别是庆阳、鄂尔多斯、青岛、固原、西安、榆林、乌海、陇南、周口、中卫,位于黄河上、中、下游的比例为 6∶2∶2,这说明上游地区生态经济效率普遍较高,在创造经济价值的同时,对环境的负面影响较小。值得深思的是,多个省会城市如兰州、银川、太原、郑州的效率排名均处于中后位置,这表明人口密集、产业集中的中心城市在生态效率提升方面面临更大挑战。而低效率城市主要集中在山东、河南两省的下游地区,以及山西、陕西的部分传统工业城市,这些地区普遍面临产业结构偏重、环境压力大的共性问题。

4.2　黄河流域生态效率影响因素分析——基于 Tobit 模型

4.2.1　因素选择和模型构建

参考已有研究成果[18,23],选择以下方面作为黄河流域生态效率影响因素:①经济发展。经济增长在初期可能增加环境压力,但跨越一定阶段后能支持绿色技术和环保设施建设,对生态效率的影响可能正向或不确定。②产业结构。第二产业占比高通常增加资源消耗和污染,但技术升级和规模效应可能缓解负面影响。对生态效率的影响不确定。③科技创新。绿色技术研发和清洁工艺应用可直接降低环境负担,对生态效率有正向作用。④财政

规模。政府财政支出可保障生态治理和绿色基础设施建设，对生态效率正向促进。⑤对外开放。外资可能带来先进技术提升效率，也可能因污染密集型产业投资产生负面效应。对生态效率的影响不确定。⑥城镇化水平。人口和经济集聚既可能增加环境压力，也可能通过集约化管理提升资源利用效率。对生态效率的影响不确定。根据以上分析，构建 Tobit 回归模型：

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 \mathrm{PGDP}_{it} + \beta_2 \mathrm{IS}_{it} + \beta_3 S_{it} + \beta_4 \mathrm{GOV}_{it} + \beta_5 \mathrm{FDI}_{it} + \beta_6 \mathrm{URB}_{it} + u \quad (3)$$

式中：Y_{it} 为被解释变量，为黄河流域第 t 年第 i 个城市的生态效率；β_0 为常数项，$\beta_1 \sim \beta_6$ 为自变量的回归系数；u 为扰动项；PGDP 为经济发展，以各城市人均 GDP 的对数表示；IS 为产业结构，以第二产业产值占地区生产总值的比重表示；S 为科技创新，以科学技术支出占地区生产总值的比重表示；GOV 为财政规模，以财政支出占地区生产总值的比重表示；FDI 为对外开放，以实际利用外商直接投资占地区生产总值的比重表示；URB 为城镇化水平，以各城市城镇化率表示。

4.2.2　结果分析

回归结果见表 3。

（1）经济发展。全流域层面，经济发展水平在 1%的显著性水平上对生态效率产生正向影响，表明经济增长为生态治理提供了坚实的物质基础。分区域来看，经济发展对生态效率的正向影响从上游到下游依次增强，下游地区系数最大且显著，上游地区则不显著。这一差异反映出下游发达地区已形成较为完善的“以发展促治理”的良性循环机制，而上游地区经济增长对生态效率的带动作用尚未充分显现，可能与其产业结构仍以资源开发为主、生态治理投入转化效率较低有关。

表 3　黄河流域生态效率影响因素 Tobit 模型回归结果

变量	黄河流域	上游	中游	下游
lnPGDP	0.240 8***	0.264 0	0.296 0**	0.317 0***
	(0.084 47)	(0.167 00)	(0.139 00)	(0.098 50)
IS	−0.000 5	0.007 2	−0.000 4	−0.000 2
	(0.002 55)	(0.005 14)	(0.006 77)	(0.002 95)
S	5.356 3***	−8.811 0	9.392 0*	4.718 0**
	(2.011 22)	(11.680 00)	(5.619 00)	(2.382 00)
GOV	0.001 9***	0.001 0	0.000 8	−0.000 2
	(0.000 53)	(0.001 00)	(0.000 76)	(0.001 83)
FDI	−0.000 1***	−0.000 1***	−0.000 3	0.006 6
	(0.000 01)	(0.000 01)	(0.024 80)	(0.014 10)
URB	−0.005 5	−0.015 8**	0.001 4	−0.003 9
	(0.004 45)	(0.007 24)	(0.006 56)	(0.005 53)
常数项	−1.501 3**	−1.310 0	−2.441 0**	−2.493 0***
	(0.714 49)	(1.307 00)	(0.950 00)	(0.873 00)

注：*、**、***分别表示在 10%、5%、1%的水平上显著；括号内为标准误。

（2）产业结构。全流域层面，产业结构对生态效率的影响不显著。这一结果反映出黄河流域产业结构调整的复杂性和长期性。上中下游地区的系数均较小且不显著，反映出当前黄河流域产业结构调整仍处于过渡阶段。一方面，传统高耗能产业尚未完全退出；另一方面，绿色制造和产业升级已开始发挥作用，两种效应相互抵消，使得整体影响不显著。

（3）科技创新。全流域层面，科技创新在 1%的显著性水平上对生态效率产生正向影响。分区域来看，科技创新对生态效率的影响呈现显著的区域异质性：中游和下游地区科技创新系数显著为正，而上游地区则为负但不显著。这一差异可能与各区域的科技投入结构与转化效率有关。中游和下游地区科教资源相对丰富，科技创新更多投向清洁生产、污染治理等绿色领域；而上游地区科技基础相对薄弱，有限的科技支出可能仍集中于传统资源开发领域，尚未形成有效的创新补偿效应。

（4）财政支出。全流域层面，财政支出在 1%的显著性水平上对生态效率产生正向影响，说明政府财政支出在生态治理中发挥了关键支撑作用。通过环保投资、生态修复工程及基础设施建设，财政支出有效促进了生态效率提升。分区域来看，上游和中游地区影响不显著，而下游地区呈现负向但不显著。这表明财政支出的生态效应具有明显的区域差异：上游地区以生态保护为主，财政资金更多用于基础保障，短期内难以转化为效率提升；中游地区财政支出结构可能偏向传统发展领域；下游地区则可能存在财政投入效率不足或挤出效应，导致其正向作用未能充分体现。

（5）对外开放。全流域层面，对外开放在 1%的显著性水平上对生态效率产生负向影响。分区域来看，对外开放的负向效应在上游地区显著，中游和下游地区则不显著。这一结果印证了“污染避难所”效应在上游地区的存在。上游地区经济发展相对滞后，在招商引资过程中可能降低了环境准入门槛，承接了部分高污染、高耗能产业转移；而中游和下游地区外资引入的产业结构相对优化，环境规制也更为严格，因此未表现出显著的负面效应。

（6）城镇化水平。全流域层面，城镇化水平对生态效率的影响不显著。分区域来看，城镇化水平

在上游地区呈现显著的负向影响,中游和下游地区则不显著。上游地区生态环境脆弱,城镇化进程中的城市扩张、基础设施建设等往往对有限的生态空间造成较大压力,且环境基础设施配套相对滞后,导致城镇化对生态效率的负面效应凸显。中游和下游地区城镇化水平较高,环境基础设施相对完善,正负效应相互抵消,使得净影响不显著。

5 研究结论与路径选择

5.1 研究结论

基于2013—2023年黄河流域68个城市的面板数据,采用超效率SBM模型测度生态效率,并运用Tobit回归模型分析其影响因素,得出如下主要结论。

(1)黄河流域生态效率整体呈现稳步上升趋势,但区域差异显著。全流域生态效率均值从2013年的0.752上升至2023年的0.891,表明在"黄河流域生态保护和高质量发展"国家战略的推动下,经济发展与生态保护的协调性逐步增强。然而,流域内部呈现出"上游高、中游居中、下游低"的梯度分布格局,上游地区平均生态效率达到0.926,而下游地区仅为0.783,反映出经济发展水平与生态效率之间存在明显的空间异质性。

(2)影响因素分析显示,全流域层面,经济发展水平、科技创新和财政规模对生态效率具有显著正向影响。其中,科技创新的促进作用最为突出,表明科技投入的创新补偿效应在黄河流域得到充分体现;经济发展水平的正向影响验证了环境库兹涅茨曲线在流域层面的适用性;财政规模的积极作用则凸显了政府主导在流域治理中的关键地位;分区域层面,各影响因素的作用方向与显著性存在区域异质性。经济发展对生态效率的正向影响从上游到下游依次增强,下游地区系数最大且显著,上游地区则不显著;科技创新在中游和下游地区显著为正,上游地区则为负但不显著;对外开放的负向效应主要集中在上游地区;城镇化水平在上游地区呈现显著负向影响,中下游地区则不显著。这些差异反映出黄河流域上、中、下游在发展阶段、资源禀赋、产业结构及治理需求上的内在差异。

(3)对外开放对生态效率产生显著负向影响,证实了"污染避难所"效应在流域范围内的存在。而产业结构与城镇化水平的影响虽为负向,但未通过显著性检验,反映出流域内产业结构转型和城镇化质量提升的复杂性和长期性。

5.2 路径选择

5.2.1 实施分区治理策略,促进区域协调发展

根据流域上中下游的自然条件和发展阶段,制定差异化的治理方案。上游地区作为水源涵养区,核心任务是筑牢生态安全屏障,通过实施最严格的生态空间管制、推进水源涵养林与高寒湿地系统修复、建立全域生态监测网络等手段进行强制性保护与系统性修复。在此基础上,严格在环境承载力范围内适度发展以国家公园为主体的生态体验旅游、高原特色农业及"光伏+牧草"等清洁能源产业。中游地区作为国家能源基地,亟须推动能源产业的绿色革命,使用清洁能源、可再生能源等新能源,实现能源集约、高效和绿色利用,同时大规模开展以地貌重塑与植被重建为核心的矿山生态修复,并持续巩固黄土高原水土流失治理成果,以工业节水增效倒逼发展方式转型。下游地区作为经济龙头,应肩负起引领绿色创新转型的使命,发展高端装备制造、节能环保服务等新兴产业。同时,以各类园区为载体,按照"横向耦合、纵向延伸"原则构建跨企业的循环经济产业链,并同步建立全流域统一的产业转移协调与环境准入机制,坚决防范污染跨区域转移,最终形成上下游联动、优势互补的流域协同发展新格局。

5.2.2 激活绿色创新动能,构建科技赋能新机制

为从根本上提升黄河流域生态效率,必须构建一个开放协同、高效运转的科技创新体系。首要任务是打造一个由政府引导、企业主体、学研支撑、金融保障的"政-产-学-研-金""五位一体"绿色技术创新联盟,形成跨区域、跨领域、跨学科的创新共同体。在技术攻关层面,应设立黄河流域绿色技术研发专项基金,重点投向清洁煤技术、工业废水深度处理与资源化回用、农业面源污染生态拦截与治理、盐碱地综合治理与高效利用等制约流域高质量发展的关键技术瓶颈。在成果转化层面,在流域内建立功能互补的区域性绿色技术转移转化中心,依托西安、郑州、济南等科教资源富集城市,构建集技术评估、中试熟化、知识产权运营于一体的线上线下技术交易平台,打通从实验室到产业化应用的"最后一公里",加速先进技术在流域内的应用。在智慧监管层面,要全面推进"数字黄河"智慧监管工程升级,通过部署空天地一体化的生态环境监测传感网络,整合卫星遥感、无人机巡航与地面自动监测站数据,并运用大数据挖掘与人工智能模型,实现对重点污染源的精准画像、排放轨迹的实时追踪

与环境风险的智能预警预报，为环境管理提供前瞻性决策支持。在人才支撑层面，推动高校、科研院所与企业间人才流动，支持流域内重点高校增设“黄河生态保护与绿色发展”交叉学科，与企业共建现代产业学院和实习实训基地，共同定制培养兼具工程技术与环境管理能力的复合型人才，为流域的发展构筑坚实的人才基础。

5.2.3 建立环境准入体系，优化外资结构

为从根本上遏制高污染、高耗能产业的无序发展，黄河流域必须建立全域统一、标准严格、执行有力的环境准入管理体系。核心举措是制定并动态更新《黄河流域产业发展负面清单与环境准入标准》，该标准应基于流域环境承载力与“三线一单”（即生态保护红线、环境质量底线、资源利用上线和生态环境准入清单）成果，针对上中下游不同区段的生态功能定位与发展需求，实施差异化的约束性指标，特别是在水资源消耗强度、污染物排放绩效和碳排放标准等方面设置全流域统一的硬杠杆。在此框架下，首先需要建立外商投资项目环境影响评估分级管理制度，将拟入项目按资源环境影响划分为禁止类、限制类与鼓励类，对煤化工、电解铝等高耗能、高排放项目实行流域内统一审批与总量控制，由省级或跨区域的流域管理机构核准，严防部分地区为追求经济增长而放松环境监管。其次应创新激励引导机制，设立外资绿色发展引导基金，对投资于节能环保、清洁能源、生态修复等绿色产业的外商，在用地指标、企业所得税、设备进口关税等方面给予政策优惠，并优先保障其用能、用水需求，形成“优质项目得实惠”的明确政策导向。同时建立流域内产业转移环境评估机制，对从中下游向上游转移的产业项目，实行输出地与接收地政府的联合审查，不仅要评估项目本身的清洁生产水平，还需评估其对接收地生态环境的累积影响，并建立产业转移的生态环境责任追溯制度，从源头上杜绝“污染避难所”效应在流域内重现。最后要推动对外开放迈向更高水平，积极加强与国际先进企业的绿色技术合作，通过共建联合实验室、设立区域研发中心等方式，鼓励外资企业将先进环境管理经验与绿色生产工艺在流域内进行本地化研发与适配，并通过技术溢出、产业链协同等途径，带动本地企业的绿色技术创新能力整体提升。通过这套“刚性约束与柔性激励并举、严格准入与积极引导结合”的组合拳，推动黄河流域外资结构向绿色化、高端化、智能化方向转变。

5.2.4 健全流域协同治理机制，夯实绿色发展制度保障

黄河流域生态效率的持续提升，最终依赖于健全而有力的制度保障体系。为此，必须构建一套涵盖协调机制、市场手段、责任追究与绩效评估的综合性机制。首先，完善黄河流域省际协调机制，推动成立由中央政府主导、流域各省区共同参与的“黄河流域生态保护和高质量发展协调委员会”，建立常态化的季度会商与应急响应制度，统筹协调跨省区的污染防治、水资源分配、生态补偿等重大事项，并构建统一的生态环境信息共享平台，实现水质、气象、污染源等数据的实时互通与业务协同，摆脱分段而治的治理困境。其次要深化生态产品价值实现机制创新，以青海黄河源区、甘肃甘南湿地等典型生态功能区为试点，开展基于生态系统生产总值的核算工作，科学量化水源涵养、水土保持、碳汇等生态服务价值，并以此为依据建立“成本共担、效益共享”的横向生态补偿制度，明确补偿资金的核算标准、支付方式与使用监管，鼓励下游受益地区通过资金补偿、产业合作、人才支持等多种方式反哺上游生态保护区，形成“保护者受益、使用者付费”的良性循环。同时要建立健全流域生态环境损害赔偿制度，明确针对非法排污、破坏性开采等行为的责任认定标准、损害评估方法和赔偿金计算方式，设立专门的生态环境损害赔偿基金，确保受损生态环境得到及时修复，显著提高环境违法成本。通过这一系列环环相扣的制度设计，为黄河流域的生态效率提升与高质量发展提供了坚实而持久的制度保障。

参考文献

[1] SCHALTEGGER S, STURM A. Ökologische rationalität: ansatzpunkte zur ausgestaltung von ökolog-ieorientierten managemen tinstrumenten[J]. Die Unternehmung, 1990, 44(4): 273-290.

[2] QUARRIGUASI F N J, WALTHER G, BLOEMHOF J, et al. A methodology for assessing eco-efficiency in logistics network[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 193(3): 670-682.

[3] VAN CANEGHEM J, BLOCK C, CRAMM P, et al. Improving-efficiency in the Steel Industry: the Arcelor-Mittal Gent case[J]. Journal of Cleaner Production, 2010, 18(8): 807-814.

[4] 刘渝，杜江，张俊飚. 湖北省农业水资源利用效率评价[J]. 中国人口·资源与环境，2007(6)：60-65.

[5] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data

envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3): 498-509.
[6] 徐峰, 李想, 舒畅, 等. 黄河流域生态效率时空分异特征及其影响因素研究[J]. 中国环境管理, 2022, 14(5): 70-78.
[7] 李刚, 张跃群, 沈颂梅. 生态效率时空演进及影响因素: 来自长三角地区的经验证据[J]. 学术交流, 2025(3): 87-103.
[8] 韩永辉, 黄亮雄, 王贤彬. 产业结构优化升级改进生态效率了吗?[J]. 数量经济技术经济研究, 2016, 33(4): 40-59.
[9] 应超, 李加林, 陈宇昕, 等. 浙江省生态文明建设效率和共同富裕耦合协调与影响因素[J]. 地域研究与开发, 2025, 44(3): 153-160.
[10] 王楠, 盖美. 基于非期望产出 SBM 模型的环渤海地区生态效率与影响因素研究[J]. 资源开发与市场, 2018, 34(6): 741-746.
[11] 李贝歌, 胡志强, 苗长虹, 等. 黄河流域工业生态效率空间分异特征与影响因素[J]. 地理研究, 2021, 40(8): 2156-2169.
[12] 刘同超. 黄河流域数字经济与生态效率的耦合机制及演化特征[J]. 统计与决策, 2025, 41(3): 123-128.
[13] 王妍, 马蓝. 数字经济与新质生产力对黄河流域生态效率的影响[J]. 人民黄河, 2025, 47(8): 39-45.
[14] 金凤君, 马丽, 许堞, 等. 黄河流域产业绿色转型发展的科学问题与研究展望[J]. 中国科学基金, 2021, 35(4): 537-543.
[15] 史歌. 高质量发展背景下黄河流域生态补偿机制的建设思路[J]. 经济与管理评论, 2023, 39(2): 49-58.
[16] 刘婷, 杨红伟. 黄河上游地区生态保护现状、治理困境及突破路径[J]. 内蒙古社会科学, 2025, 46(5): 9-17.
[17] 薛婕, 翁智雄, 刘婷婷, 等. 推进黄河流域生态保护和高质量发展的柔性科技治理机制研究[J]. 环境保护, 2024, 52(7): 38-41.
[18] 杨玉春, 岳立. 黄河流域全要素生态效率测度及影响因素分析[J]. 统计与决策, 2021, 37(19): 121-124.
[19] 沙德春, 王茂林. 黄河流域高质量发展效率的演变及耦合协调水平[J]. 科技管理研究, 2022, 42(20): 80-88.
[20] 陈明华, 王山, 刘文斐. 黄河流域生态效率及其提升路径: 基于 100 个城市的实证研究[J]. 中国人口科学, 2020(4): 46-58, 127.
[21] 任保平, 杜宇翔. 黄河流域经济增长-产业发展-生态环境的耦合协同关系[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(2): 119-129.
[22] 时朋飞, 王梦君, 张鸿浩, 等. 黄河流域城市绿色发展效率的分异特征与数字经济的驱动效应[J]. 经济地理, 2025, 45(7): 85-94.
[23] 郑强, 苏燕, 董战峰. 黄河流域绿色金融对生态经济效率的影响[J]. 生态文明研究, 2024(6): 52-65.

Evaluation of Ecological Efficiency in Yellow River Basin

LI Yunrong, LI Mengxin

(School of Economics, Xi'an University of Finance and Economics, Xi'an 710000, China)

Abstract: The Yellow River Basin spans the eastern, central, and western regions of China and plays a crucial role in the country's ecological security and socio-economic development. Based on panel data of prefecture-level cities in the Yellow River Basin from 2013 to 2023, an ecological efficiency evaluation index system was constructed, ecological efficiency was measured using a super-efficiency SBM model, and influencing factors were analyzed through a Tobit regression model. The research findings are as follows: ecological efficiency in the Yellow River Basin exhibits a steady upward trend overall, but with significant regional disparities, forming a spatial pattern characterized by "higher in the upstream, moderate in the midstream, and lower in the downstream." Economic development level, technological innovation, and fiscal scale have significant positive effects on ecological efficiency, while openness to the outside world shows a significant negative effect. Based on these findings, policy recommendations are proposed to enhance ecological efficiency in the Yellow River Basin, including region-specific governance, green innovation, environmental access regulation, and the establishment of coordinated mechanisms.

Keywords: Yellow River Basin; ecological efficiency; super-efficiency SBM model; Tobit model