

黄河流域物流业生态效率及降污潜力研究

董千里¹ 白东灵^{1,2} 王东方³¹

(1. 长安大学 经济与管理学院, 陕西 西安 710064;

2. 郑州航空工业管理学院 管理工程学院, 河南 郑州 450046;

3. 武夷学院 商学院, 福建 武夷山 354300)

【摘要】: 物流业高质量发展的一个重要方面是生态化要求。以物流业 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 等污染物排放量为非期望产出, 基于 SBM-Undesirable 和 Super-SBM-Undesirable 模型, 建立物流业生态效率及其三类提升潜力测度体系; 在识别三类潜力不同提升效果的基础上, 分析 2004—2017 年黄河流域内外部的物流业生态效率, 运用 ESDA 方法从空间演化角度揭示降污潜力挖掘的重点区域和重点联动区域。分析表明: 黄河流域物流业生态效率落后于黄河流域以外区域, 且落后差距随时间持续扩大; 呈“上游低、中游居中、下游高”的显著性差异, 且差异随时间呈稳定趋势; 相较于资源节约和增加期望产出, 挖掘降污潜力是提升效率、缩小差距的最有效途径; 上游是降污潜力挖掘的重点区域, 甘肃、青海、山西具有降污强联动性。最后结合研究结论, 提出针对性政策建议。

【关键词】: 物流业 生态效率 降污潜力 黄河流域 集成场

【中图分类号】: F062.2; F572 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2021)05-034-09

黄河流域贯穿我国经济相对落后、欠发达和发达地区, 是农产品、能源、化工等物资的主要供应地, 物流业十分活跃, 但质量发展水平呈多层次特点。据国家统计局官网数据显示, 2018 年黄河流域九省区经济生产总值 23.9 万亿元, 占比全国 26.5%; 与物流业密切相关的交通运输、仓储、邮政业增加值 1.15 万亿元, 占比全国 28.5%; 货运量 154.7 亿吨, 占比全国 30%。一方面, 物流业作为国民经济发展的支柱性、战略性和先导性产业^[1], 对黄河流域滞后的经济发展引领作用突出; 另一方面, 物流业长期处于高能耗、高排放、高污染发展状态^[2], 远不能满足保护黄河流域生态环境的要求。习近平总书记在 2019 年 9 月 18 日召开的黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上明确指出: “黄河流域生态保护和高质量发展, 同京津冀协同发展、长江经济带发展、粤港澳大湾区建设、长三角一体化发展一样, 是重大国家战略。”^[3]黄河流域生态保护和高质量发展必须在保持经济发展的同时, 统筹推进生态环境保护。因此, 如何准确把握物流业推动经济的战略要求, 又能维持生态发展要求, 在考虑物流业经济动能最大化的同时受生态环境约束, 最大限度发挥物流业对经济发展的支柱、战略、先导作用, 对黄河流域生态保护、突出物流业高质量发展的重大意义。

物流业是典型的生产性服务业, 其产出效率与所服务的产业经济效率密切相关, 考虑环境约束的物流业生态效率研究很早就受到国内外学者的热切关注, 一个重要的观点就是, 物流业单位产出的碳排放是随着物流业产出效率降低的^[4], 这一现象也可

作者简介: 董千里, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为物流与供应链管理。E-mail: dongql169@vip.sina.com

基金项目: 国家社会科学基金重点项目“基于集成场理论的中国物流业高质量发展机制研究”(20AJY015); 国家社会科学基金项目“中国城市物流发展空间结构演化特征与机理研究”(19XJL004); 中央高校基本科研业务资助项目“双循环经济格局下物流业高质量发展与制造业升级研究”(300102341667)

从黄河流域物流业生态效率反映出来。现有文献从考虑碳排放的物流业效率、环境效率、绿色效率、可持续发展绩效、生态效率等不同方面展开研究。在考虑碳排放的物流业效率方面，杨雪等^[5]以 CO₂ 排放量为投入变量，构建了碳排放约束下的物流效率评价体系；在环境效率方面，Lu 等^[6]以 LPI、CO₂ 排放等建立指标体系，研究了 112 个国家的环境物流绩效指数 (ELPI)；范建平^[7]以碳排放量作为非期望产出，测度了我国 2012 年省际物流业的环境效率；在可持续绩效方面，Rashidi & Cullinane^[8]考虑 CO₂ 排放，研究了 22 个 OECD 成员国可持续运营物流绩效 (SOLP)；Wang 等^[9]以物流业 CO₂ 排放量代表其绿色绩效，探讨了绿色物流与国家贸易间的关系；在生态效率方面，周叶等^[10]以 CO₂ 和 SO₂ 为环境投入，对 2006—2011 年我国 23 个省域物流行业生态效率进行评价，发现东部物流行业生态效率高于西部，且生态效率存在较强的时空差异性；Long 等^[11]以 CO₂ 为非期望产出，对 2004—2016 年长江经济带 11 个省市的物流业生态效率进行了评价，并分析了其影响因素。

通过梳理对比相关文献发现，由德国学者 Schaltegger & Sturm^[12]提出的生态效率被广泛认为是经济与环境协调发展的合适测度，能提供更好的经济和环境绩效，并可从投入冗余和产出不足方面分析其提升潜力，相关文献在研究层面和测度方法上各有不同。在区域层面，黄建欢等^[13]对中国城市生态效率进行了研究，发现如果将生态效率指标引入到地方官员的考核中，将会提升城市的环境和经济发展水平；Liu 等^[14]考虑 NO_x 等污染物，对山西循环经济系统的生态效率进行了评价，从投入冗余和产出不足方面分析了提升潜力；Yang & Zhang^[15]考虑烟尘和 PM 颗粒等污染物，研究了 2003—2014 年中国区域生态效率的动态趋势，并将绩效波动分解为资源、环境和经济效率；在行业层面，王永静和陈增增^[16]采用 Super-SBM 模型，以农业面源为非期望产出，对天山北坡经济带的农业生态效率静态水平和区域差异的敛散性进行了研究；Egilmez & Park^[17]采用两步层次分析法，量化了美国制造业与交通运输相关的碳、能源和水足迹 (FP)，基于生态效率得分对环境与经济绩效进行评价。在测度方法上，SBM-Undesirable 和 Super-SBM-Undesirable 模型，因其非径向、有效区分好坏产出等优点成为主流方法^[11,16,18]。

综上，现有文献对物流业环境约束、生态效率均进行了较为深入的研究，为本研究提供了重要基础，但还存在以下研究不足和空白：一是物流业环境约束多以 CO₂ 和碳排放量为指征指标，相较于区域和其他行业生态效率测度指标存在明显不足，且与物流业消耗大量能源，产生 NO_x、PM 颗粒物而对环境造成污染的实际情况有一定出入；二是相比于长江经济带等区域，鲜有文献深入到黄河流域，对物流业生态效率展开研究。对此，本文考虑物流业排放的 NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂ 等 4 种污染物，建立物流业生态效率及三类提升潜力测度体系，对 2004—2017 年包含黄河流域九省区在内的中国 30 个省份 (西藏和港澳台地区除外) 的物流业生态效率和三类提升潜力进行测度，对比分析黄河流域内外部物流业生态效率，识别三类潜力对生态效率的不同提升效果，并进一步从空间演化角度揭示物流业降污潜力挖掘的重点区域和重点联动区域，结合研究结论提出针对性政策建议，以期提升黄河流域物流业生态效率提供理论决策参考，助力黄河流域生态保护和高质量发展。

1 研究方法 & 数据选择

1.1 主要研究方法

1.1.1 物流业生态效率及三类提升潜力测度体系

传统 CCR、BCC 等 DEA 模型没有考虑到废水等非期望产出，且在弱有效决策单元的有效改进中，只考虑了所有投入和产出等比例增减的径向部分，没有充分考虑松弛改进在效率值上的体现。为此，Tone^[19]在 2003 年提出了 SBM-Undesirable 模型，它是考虑非期望产出的非径向 SBM 模型，目前被广泛应用于生态效率测度体系中。

本文借鉴 Tone^[19]的思想，先构造出一个物流业生产可能性集，假设用 DMU_o 表示决策单元，每个决策单元都有 m 种投入、 q_1 种期望产出、 q_2 种非期望污染物产出，其向量形式为 $x \in R^m$ 、 $y^1 \in R^{q_1}$ 、 $y^2 \in R^{q_2}$ ，矩阵表达形式为 $X=(x_1, x_2, \dots, x_m) \in R^{n \times m}$ 、 $Y^1=(y_1^1, y_2^1, \dots, y_n^1) \in R^{n \times q_1}$ 、 $Y^2=(y_1^2, y_2^2, \dots, y_n^2) \in R^{n \times q_2}$ ，且假定 $X>0$ 、 $Y^1>0$ 、 $Y^2>0$ 。则物流业生产可能性集定义为：

$$P(x) = \{(x, y^+, y^b) : x \text{ 生产 } (y^+, y^b) | x \geq X\lambda, y^+ \leq Y^+\lambda, y^b \geq Y^b\lambda, \lambda \geq 0\}$$

基于上述系统，构建 SBM-Undesirable 数学模型如下：

$$\min \rho^* = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{q_1 + q_2} \left(\sum_{k=1}^{q_1} \frac{s_k^{w+}}{y_{k0}^w} + \sum_{k=1}^{q_2} \frac{s_k^{b-}}{y_{k0}^b} \right)}$$

$$s.t. \begin{cases} x_{i0} = \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j + s_i^- & i=1, 2, \dots, m \\ y_{k0}^w = \sum_{j=1}^n y_{kj}^w \lambda_j - s_k^{w+} & k=1, 2, \dots, q_1 \\ y_{k0}^b = \sum_{j=1}^n y_{kj}^b \lambda_j + s_k^{b-} & k=1, 2, \dots, q_2 \\ s_i^- \geq 0, s_k^{w+} \geq 0, s_k^{b-} \geq 0, \lambda_j \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中： x_{i0} 、 y_{k0}^w 、 y_{k0}^b 表示实际投入、期望产出和非期望污染物产出； s_i^- 、 s_k^{w+} 、 s_k^{b-} 表示物流系统投入、期望产出和非期望污染物松弛变量，代表最优化目标值与实际值的差距。目标函数 ρ^* 取值在 0~1 范围内，当 $\rho^*=1, s_i^- = s_k^{w+} = s_k^{b-} = 0$ 时，表示该决策单元有效；当 $0 \leq \rho^* < 1, s_i^-, s_k^{w+}, s_k^{b-}$ 不全为 0 时，表示该决策单元处于无效状态，存在效率提升潜力，可通过调整投入产出提升效率。参考相关研究成果^[14]，物流业生态效率提升潜力可分解为资源节约潜力、期望产出增加潜力、降污潜力。

资源节约潜力：

$$IP_x = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{i0}} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

期望产出增加潜力：

$$IP_w = \frac{1}{q_1} \sum_{k=1}^{q_1} \frac{s_k^{w+}}{y_{k0}^w} \quad (k=1, 2, \dots, q_1) \quad (3)$$

降污潜力：

$$IP_b = \frac{1}{q_2} \sum_{k=1}^{q_2} \frac{s_k^{b-}}{y_{k0}^b} \quad (k=1, 2, \dots, q_2) \quad (4)$$

式中： $\frac{s_i^-}{x_{i0}}$ 表示决策单元第 i 项资源可节约潜力； $\frac{s_k^{w+}}{y_{k0}^w}$ 表示第 k 项期望产出可增加潜力， $\frac{s_k^{b-}}{y_{k0}^b}$ 表示第 k 项非期望污染物可降低排放潜力； $\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{i0}}$ 表示决策单元所有资源节约潜力的平均值；同理， $\frac{1}{q_1} \sum_{k=1}^{q_1} \frac{s_k^{w+}}{y_{k0}^w}$ 表示所有期望产出可增加潜力的平均值； $\frac{1}{q_2} \sum_{k=1}^{q_2} \frac{s_k^{b-}}{y_{k0}^b}$ 表示所有非期望污染物可降低排放潜力的平均值。

在 SBM-Undesirable 模型中，决策单元效率值最大为 1 且多个决策单元同时为 1，不便于进行有效决策单元效率的比较。为

此, Tone 借鉴 Andersen & Petersen^[20]的做法, 在 2002 年又提出 Super-SBM 模型。基于 SBM-Undesirable 和 Super-SBM 模型, 本文采用 Super-SBM-Undesirable 模型对生态效率值为 1 的决策单元进一步测度其超效率值, 由于该模型在现有文献中较为常见, 故不再详细列出, 具体数学模型可参考相关应用文献^[11,16]。

1.1.2 改进的熵权法

熵权法是一种客观赋权的方法, 被广泛应用于综合评价系统中。为克服传统熵权法评价中出现零值、负值和极值的问题, 探究物流业 NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂ 四种污染物排放量的综合影响, 本文采用改进的熵权法^[21]计算中国 30 个省份 2004—2017 年的物流业环境污染综合指数。

1.1.3 ESDA(探索性空间数据分析)

ESDA 是分析空间关联及分布特征的一系列空间分析方法的统称^[11]。目前最常用的指标是度量某个属性在全域内空间关联程度的全局 Moran' sI 指数, 以及在子区域内空间关联分异特征的局部 Moran' sI 指数。本文运用以上两个指标来探究黄河流域物流业降污潜力的空间关联关系。

1.2 指标选择和数据来源

1.2.1 指标选择

为科学选取物流业生态效率测度指标, 本文结合相关文献选出备选指标, 根据备选指标制作调查问卷, 通过微信链接和纸质邮寄的方式在物流和环境领域的政府部门、专家学者、行业协会间发放, 问卷共发放 95 份, 回收 86 份, 剔除无效问卷 5 份, 有效回收 81 份。以各指标被选中的问卷与有效问卷数量比例, 计算各指标选定百分比, 并将 50%作为门槛值选定指标, 以“√”标注。各备选指标及指标选定情况详见表 1。

1.2.2 指标数据

本文将黄河流域九省区置于全国视野, 根据表 1 选定指标收集 2004—2017 年我国 30 个省份的物流业相关基础数据, 研究空间范围包括全国、黄河流域以外区域、黄河流域、黄河上游、黄河中游和黄河下游。其中, 黄河上游包括青海、四川、甘肃、宁夏, 中游包括内蒙古、陕西、山西, 下游包括河南、山东。由于当前我国各省份的产业体系中尚未有“物流业”专门分类, 而交通运输、仓储及邮政业占物流业增加值 85%以上^[5,11,21], 因此, 提取交通运输、仓储及邮政业的相关数据来替代区域物流业指标。

(1) 投入指标数据。

表 1 物流业生态效率投入产出指标选取表

指标类型	备选指标	指标含义	指标被选定百分比	指标选定情况
投入指标	物流业固定资产总额	一定时期内物流业固定资产存量	64.2%	√
	货运车辆数	公路、铁路等货运车辆总数	42.0%	
	物流业能源消耗量	物流业各类终端能源消费量	84.1%	√

	物流网络里程	公路、铁路、水路等里程加总	22.2%	
	物流用地投入	物流仓储用地面积	37.3%	
	物流科技研发经费投入	物流业科技研发经费投入	19.8%	
	物流业劳动力投入	物流业从业人数	66.7%	√
期望产出	货物周转量	公路、铁路等运输方式货物周转量加总	71.6%	√
	货运量	公路、铁路等运输方式货运量加总	25.9%	
	物流业增加值	物流业产业增加值	84.1%	√
	物流业利润额	物流业实际利润总额	44.5%	
	物流业税收额	物流业实际税收总额	25.9%	
非期望产出	物流业 CO ₂ 排放量	物流运作中二氧化碳排放量	51.9%	√
	物流业 SO ₂ 排放量	物流运作中二氧化硫排放量	63.0%	√
	物流业 NO _x 排放量	物流运作中氮氧化物排放量	75.3%	√
	物流业 PM _{2.5} 排放量	物流运作中直径不大于 2.5 微米颗粒物排放量	64.2%	√
	物流业 PM ₁₀ 排放量	物流运作中直径不大于 10 微米颗粒物排放量	53.1%	√
	物流业噪声污染量	物流运作过程中带来的噪声污染量	29.6%	

选取物流业劳动力投入、固定资产总额、能源消耗量作为投入指标。以物流业从业人数作为劳动力投入数据；使用永续盘存法^[21]估算物流业固定资产总额数据，其中，折旧率取 9.6%，固定资产资本存量以 2003 年为基期使用资本产出比例推法^[22]获得；以物流业不同类型能源换算标准煤系数^[7]统一转换加总得出物流业能源消耗量数据。

(2) 期望产出和非期望污染物排放数据。

选取货物周转量和物流业增加值作为期望产出。以公路、铁路、水路三种货物运输方式的周转量加总得到货物周转量数据；以 2003 年为基期将物流业增加值折算为不变价格，作为物流业增加值数据。

考虑到物流业实际运作过程中，CO₂ 未被作为环境污染物监测对象，为避免 CO₂ 排放量稀释物流业环境污染综合指数数据，本文没有将 CO₂ 考虑在物流业非期望污染物内，而是将物流业运作过程中产生的 NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂ 污染物排放量作为非期望产出，并运用改进熵权法测算物流业环境污染综合指数，作为非期望污染物排放的代理变量。根据各省份能源平衡表中物流业各类一次能源消耗量，使用排放系数法测算 2004—2017 年各省份物流业 NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂ 排放量。借鉴国外 EPA、AP-42 和北京排放系数^[23-24]，结合我国物流业发展实际情况，本文采用的排放系数详见表 2。

1.2.3 数据来源

2004—2017 年中国 30 个省份的相关基础数据来源于《中国统计年鉴》(2005—2018 年)、《中国能源统计年鉴》(2005—2018

年)、各省份统计年鉴, 缺失数据采用差值法补齐。

2 结果与分析

2.1 黄河流域物流业生态效率差异比较分析

基于 SBM-Undesirable 和 Super-SBM-Undesirable 模型, 运用 MAXDEAUltra7.8.1 软件对黄河流域内外部中国 30 个省份的物流业生态效率进行测度, 测度结果由于篇幅限制, 没有列出详细数值。

2.1.1 外部区域差异比较

从黄河流域外部看, 黄河流域物流业生态效率落后于黄河流域以外区域, 且落后的差距随时间持续扩大。

从图 1 可以看出, 研究期内黄河流域物流业生态效率均低于全国和黄河流域以外区域。在 2004—2008 年 3 条折线均呈现出先降后升的“V”型走势, 生态效率下降快回升快, 黄河流域与全国差距从 2004 年的 0.168 变为 2008 年的 0.063, 与黄河流域以外区域差距从 2004 年的 0.239 变为 2008 年的 0.089, 差距呈缩小趋势; 在 2008—2012 年 3 条折线虽然也呈现趋同的“V”型走势, 但黄河流域效率下降快却回升慢, 效率与全国差距由 0.063 变为 0.127, 与黄河流域以外区域差距由 0.089 变为 0.181, 差距呈扩大趋势; 而在 2012—2017 年全国及黄河流域以外区域效率持续上升且趋于平稳, 而黄河流域效率走势却持续下降, 效率与全国差距由 0.127 变为 0.220, 与黄河流域以外区域差距由 0.181 变为 0.314, 差距进一步扩大。这是由于黄河流域九省区多地处内陆, 且大多数省区处在西部地区, 经济发展相对滞后, 对外开放程度较低, 在过去十几年的发展中我国东部与西部、沿海与内陆发展差距扩大化在物流业生态发展上显现。

2.1.2 内部区域差异比较

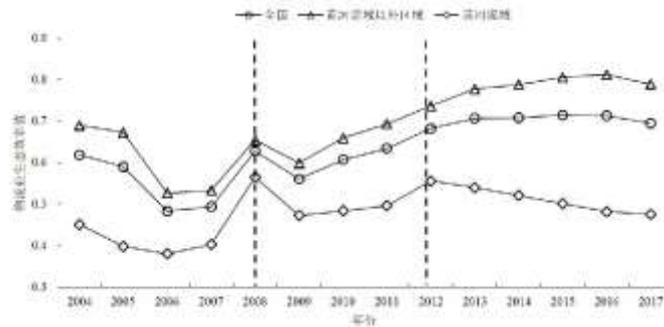


图 1 黄河流域物流业生态效率外部差异对比图

从黄河流域内部看, 物流业生态效率呈现“上游低、中游居中、下游高”的显著性差异, 且差异随时间呈稳定趋势。从图 2 的物流业生态效率四分位间距和均值所处位置看, 最下游的山东物流业生态效率处在高值稳定状态, 最下游的四川、青海处在低值稳定状态; 甘肃、宁夏、内蒙古、陕西稳定性处于下游的河南与上游的四川、青海之间, 均值也处在下游的河南、山东与上游的青海、四川之间, 总体处于平均水平; 生态效率均值最高的是最下游的山东(1.0148), 其次是河南(0.7032)、内蒙古(0.5589)、陕西(0.4428)、山西(0.4350), 均值最低的是最上游的青海(0.2352), 总体下游省区均值高于中游, 中游均值高于上游, 黄河上、中、下游物流业生态效率差异显著。

表 2 物流业一次能源 NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀ 和 SO₂ 排放系数

指标	原煤 /(kg/t)	其他洗煤 /(kg/t)	焦炭 /(kg/t)	原油 /(kg/t)	汽油 /(kg/t)	柴油 /(kg/t)	燃料油 /(kg/t)	天然气 /(g/m ³)	液化天然气 /(kg/t)
NO _x	4.0	4.0	4.8	5.09	16.7	9.62	5.84	1.76	2.1
PM _{2.5}	0.74	0.74	0.144	0.06	0.125	0.31	0.31	0.17	0.15
PM ₁₀	1.61	1.61	0.288	1.6	0.25	0.31	0.31	0.24	0.22
SO ₂	10.0	10.0	19.0	2.75	1.6	2.24	2.24	0.18	0.18

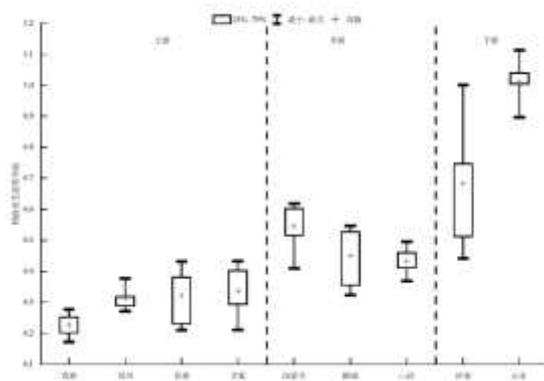


图 2 黄河流域内部九省区物流业生态效率箱线图

从图 3 可见，2004—2008 年除山东、青海、四川外，其他省区效率值均出现不同程度的波动；2009—2012 年除河南出现较大幅度波动外，其他省区均趋于稳定状态；2013—2017 年所有省区效率值均趋于稳定状态，这说明黄河流域物流业生态效率空间差异没有随时间得到改善，而是呈现出稳定趋势。这是由于黄河流域横跨我国西、中、东部，各省区经济和物流业发展各具特色，差异的稳定化有必然因素。一方面，各省区国土面积、人口密度、产业基础不同，如青海地域辽阔，人口密集度低，物流业规模集聚度也相对较低，而下游的山东作为黄河入海省份，具有先天港口优势，产业基础优势突出；另一方面，黄河在新中国成立后就没有通航历史，在经济联系上不同于长江经济带，缺少物流发展的门户枢纽城市，导致了黄河流域物流业生态效率差异的稳定趋势。

2.2 黄河流域物流业生态效率三类提升潜力分析

2.2.1 生态效率的三类提升潜力框架

为提升物流业生态效率，本文基于物流业生态效率及三类提升潜力测度体系，提出物流业生态效率的三类提升潜力框架，详见图 4。物流业生态效率提升潜力可分解为资源节约潜力、期望产出增加潜力和降污潜力三类，其中资源节约潜力包括劳动力、资产和能源节约潜力，期望产出增加潜力包括增加值、货运周转量增加潜力。

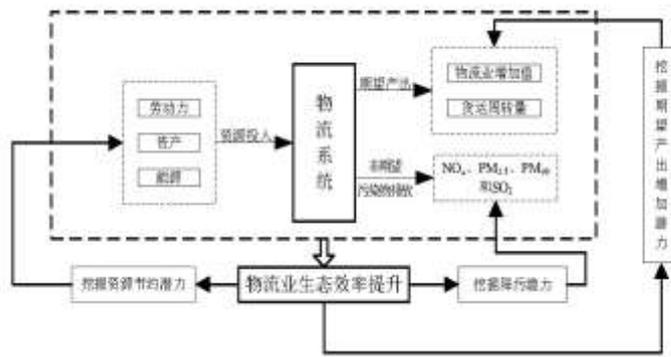


图4 物流业生态效率三类提升潜力框架图

2.2.2 三类潜力提升效果识别分析

通过潜力测算公式，对2004—2017年黄河流域及其以外区域各类提升潜力进行测算，全国及黄河流域物流业生态效率、各类投入产出提升潜力值和排名详见表3。

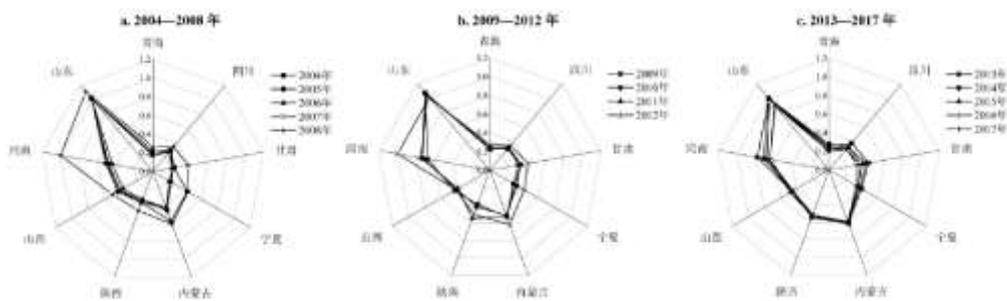


图3 黄河流域内部九省区物流业生态效率雷达图

表3 2004—2017年全国及黄河流域物流业生态效率、各类提升潜力值及排序(历年均值)

区域	物流业生态效率	资源节约潜力	各类资源节约潜力			期望产出增加潜力	各类期望产出增加潜力		降污潜力
			劳动力	资产	能源		增加值	货运周转量	
全国	0.631	0.340	0.393	0.250	0.375	0.031	0.012	0.050	0.561
黄河流域以外区域	0.695	0.304	0.369	0.214	0.328	0.041	0.016	0.066	0.518
黄河流域	0.481	0.223	0.249	0.134	0.286	0.007	0.002	0.013	0.661
青海	0.227(9)	0.465(1)	0.471(1)	0.464(1)	0.459(3)	0.000(7)	0.000(3)	0.000(6)	0.865(1)

四川	0.311(8)	0.390(2)	0.423(2)	0.328(2)	0.318(4)	0.011(4)	0.000(3)	0.022(3)	0.731(5)
甘肃	0.322(7)	0.382(3)	0.388(3)	0.288(4)	0.471(1)	0.000(7)	0.000(3)	0.000(6)	0.832(3)
宁夏	0.337(6)	0.370(4)	0.329(6)	0.320(3)	0.360(2)	0.001(5)	0.003(2)	0.000(6)	0.863(2)
内蒙古	0.546(3)	0.141(8)	0.148(8)	0.036(9)	0.239(8)	0.000(7)	0.000(3)	0.000(6)	0.774(4)
山西	0.449(4)	0.265(5)	0.332(5)	0.078(6)	0.385(5)	0.001(5)	0.000(3)	0.003(5)	0.722(6)
陕西	0.434(5)	0.257(6)	0.343(4)	0.077(7)	0.352(6)	0.013(3)	0.000(3)	0.027(2)	0.673(7)
河南	0.682(2)	0.197(7)	0.294(7)	0.038(8)	0.259(7)	0.017(2)	0.017(1)	0.018(4)	0.349(8)
山东	1.014(1)	0.042(9)	0.012(9)	0.081(5)	0.033(9)	0.023(1)	0.000(3)	0.045(1)	0.035(9)

从黄河流域各省区物流业生态效率和各类提升潜力排序对比大致来看，物流业生态效率值低的区域，提升潜力较大，物流业生态效率排序越靠后，对应资源节约和降污潜力排序越靠前。除山东外，其他省区降污潜力均高于各类资源节约潜力，劳动力、资产和能源节约潜力又显著高于增加值和货运周转量增加潜力，从集成场微观经济动能看，这意味着黄河流域物流业存在着大量的污染物产出冗余，中等的资源冗余及较少的期望产出不足，即在那些地区集成体被动地承受为多，而集成体主动形成网链改变动力不足；在不考虑技术进步的情况下，挖掘期望产出增加潜力、资源节约潜力对提升物流业生态效率都比较有限，挖掘降污潜力是提升物流业生态效率的有效途径。

从区域对比看，黄河流域需要减少污染物排放 66.1%或者减少资源投入 22.3%，又或者增加期望产出 0.7%才能达到物流生产有效；而在黄河流域以外区域减少污染物排放 51.8%或者减少资源投入 30.36%，又或者增加期望产出 4.1%可达到物流生产有效，这意味着黄河流域物流业在降低污染方面比其他区域更具有提升生态效率的潜力。

从图 5 中可以看出，黄河流域降污潜力占其三类潜力总和的 74.1%，这比全国的 60.2%高出 23%，除山东外，其他省区降污潜力均高于全国平均水平，而资源节约潜力、期望产出增加潜力除山东外，明显低于全国平均水平。因此，挖掘黄河流域物流业降污潜力是提升生态效率、缩小与其他区域效率差距的最有效途径。

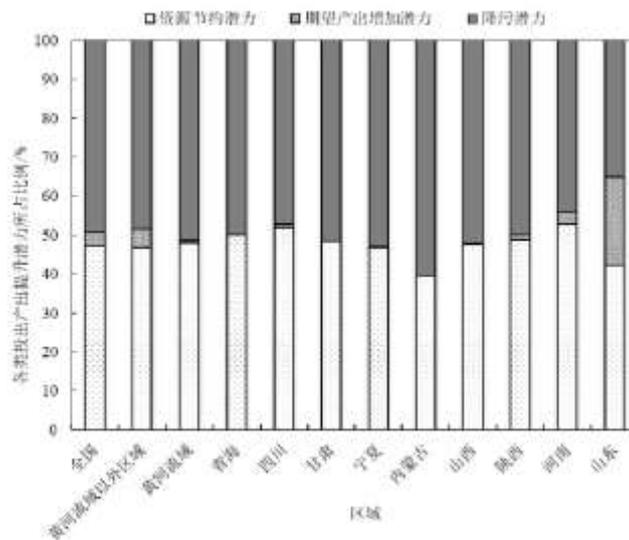


图 5 全国及黄河流域九省区三类提升潜力所占比例示意图

3 黄河流域物流业降污潜力空间演化分析

降低物流业环境污染是在不降低物流业期望产出前提下，最大程度挖掘降污潜力。将黄河流域九省区 2004—2017 年降污潜力从时序和空间上对比，发现不同区域、不同时段降污潜力存在一定差异，需从空间关联角度探究黄河流域降污潜力的相互影响和演化趋势，以揭示黄河流域物流业降污潜力挖掘的重点区域和重点联动区域。

3.1 黄河流域物流业降污潜力空间分布

为分析黄河流域物流业降污潜力，结合 2017 年九省区降污潜力数据，采用 ArcGIS 中的自然间断点分级法，将降污潜力分为高潜力、较高潜力、较低潜力和低潜力四类。在此分类基础上，采用 ArcGIS10.2 软件绘制得到 2004 年、2010 年和 2017 年黄河流域九省区物流业降污潜力的空间分布图，如图 6 所示。

从图 6 可知，2004 年物流业降污高潜力区域集中在黄河上游的青海，较高潜力集中在甘肃、四川；到 2010 年，物流业降污高潜力区域由黄河上游向中游大面积扩散，除四川保持潜力稳定外，黄河中上游的所有省区都演变为高潜力区域，这说明 2005—2010 年黄河流域降污潜力未被挖掘，物流业环保意识的淡薄、野蛮粗放式的发展大大增加了降污压力；而 2011—2017 年随着“环境友好型”社会建设理念在黄河流域不断深入，中上游的陕西、内蒙古、山西、甘肃降污潜力得到了不同程度的挖掘，但由于各省区物流业环境约束等差异，降污高潜力区域在 2017 年仍然集中在上游。

因此，从降污高潜力区域“上游集中—中上游扩散—上游集中”的演化趋势看，上游一直是降污高潜力区域，是未来黄河流域挖掘物流业降污潜力的重点区域。

3.2 黄河流域物流业降污重点关联区域演化分析

3.2.1 全局空间关联分析

为进一步分析九省区物流业降污潜力空间关联关系，采用全局 Moran' sI 指数来表示区域物流业降污潜力的全局空间自相关关系。由表 4 可知，黄河流域九省区 Moran' sI 指数均为正值，除个别年份外均在 1%显著性水平上显著，说明黄河流域物流业降污潜力在全局上存在正向自相关关系；Moran' sI 指数呈前期小幅波动、后期大幅上升趋势，说明黄河流域物流业降污潜力的空间相关性正在逐步增强。这是因为物流业服务于商品流通，运作过程具有很大流动性，而随着跨省份商品贸易的日益频繁，商品流通速度在加快，由此带来的物流业污染物排放及降污潜力的空间相关性增强是必然的。

3.2.2 局部空间关联分析

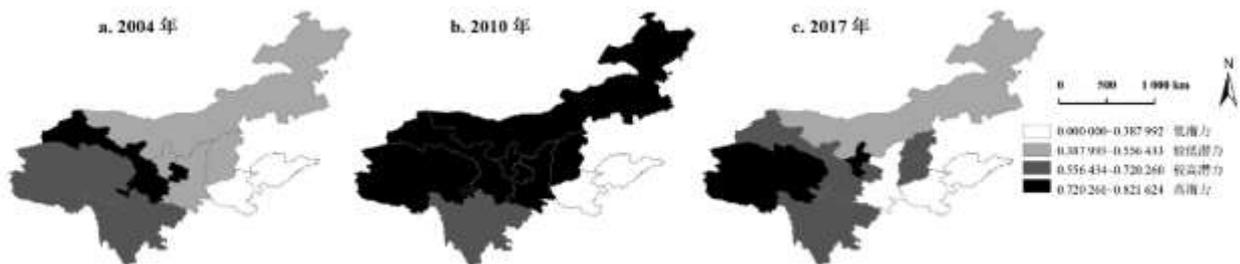


图 6 黄河流域物流业降污潜力空间分布图

为进一步研究降污潜力局部区域集聚及关联模式，揭示黄河流域降污潜力的重点关联区域，选取 2004 年、2010 年、2017 年截面数据，采用局部莫兰指数的 LISA 集聚图来揭示不同省区间降污潜力空间联系的重点区域。运用 Geoda 软件绘制 2004 年、2010 年、2017 年黄河流域九省区的 LISA 集聚图，如图 7 所示。

由图 7 可知，四川、宁夏、陕西、河南四省区的局部集聚效应始终不明显，说明这些省区降污潜力的关联性较弱，降污潜力的挖掘可以提升自身生态效率，但对周边省区物流业生态效率提升不明显；降污潜力“高一高”集聚区始终集中在青海、甘肃，说明这两省降污带动性强，是降污的重点联动区域，如果在这两个省加强物流业污染治理，不仅会带动这两个省物流业生态效率的提升，还会对周边省区物流业生态效率的提升具有很强的促进作用；“低—低”集聚区在 2004 年分布在山东、内蒙古，说明这两个省区在 2004 年物流业降污潜力较低且其周边降污潜力也较低，如果这两个省区物流业污染治理能够保持高压状态，将对周边降污潜力的挖掘具有促进作用，但从图 7b 和 7c 来看，在 2004 年之后两省区对周边地区降污带动作用没有发挥。值得注意的是，“高一低”集聚区在 2010 年分布在山西，说明山西与其周边省区降污潜力差异较大，本身降污潜力高，但周边省区降污潜力低，而到了 2017 年，山西呈现“低—低”集聚特征，说明在 2011—2017 年山西降污潜力得到有效挖掘，物流业污染治理的带动性在逐步增强。

因此，从降污潜力空间关联演化趋势看，青海、甘肃、山西具有降污强联动性，是黄河流域物流业降污的重点联动区域。这是因为青海、甘肃、山西三省矿产、煤炭等资源丰富，是物资外运大省，且在我国物流大通道基本格局中都占据承东启西、连贯南北的重要节点位置。甘肃位于我国两条东西向陇海兰新和西北北部物流大通道的叠加位置，是我国东西向物资流通的必经之地，青海和山西也分别处于京拉、呼昆物流大通道的核心区域。在这三个省加大物流业污染治理和监测，将对黄河流域整体的物流业生态效率有更明显的促进作用。具体来说，应在青海、甘肃重点加强物流业污染治理，发挥青海、甘肃对黄河中上游的降污强带动性，从而带动中上游省区物流业高降污潜力挖掘，快速有效地提升生态效率；在山西重点加强物流业污染治理和持续监测，发挥其降污低潜力联动性，在保持降污潜力有效挖掘的前提下，带动黄河中上游省区生态效率高位提升。

表 4 2004—2017 年黄河流域各省区物流业降污潜力 Moran' sI 值及 P 值

指标	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
Moran' sI	0.311	0.316	0.248	0.304	0.382	0.431	0.381	0.344	0.309	0.345	0.360	0.383	0.449	0.513
P-value	0.006	0.001	0.002	0.002	0.008	0.002	0.006	0.013	0.022	0.010	0.008	0.007	0.005	0.002

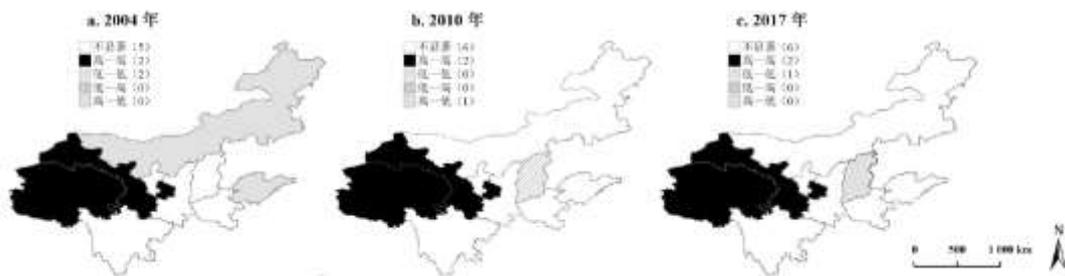


图 7 黄河流域物流业降污潜力 LISA 集聚图

4 研究结论和政策建议

本文将黄河流域置于全国视野，对 2004—2017 年黄河流域内外部的物流业生态效率及三类提升潜力进行了测度，对比分析了黄河流域内外部生态效率，在识别出挖掘降污潜力是提升生态效率最有效途径的基础上，从空间演化角度揭示了降污潜力挖掘的重点区域和重点联动区域，研究结论与政策建议对应关系见图 8。

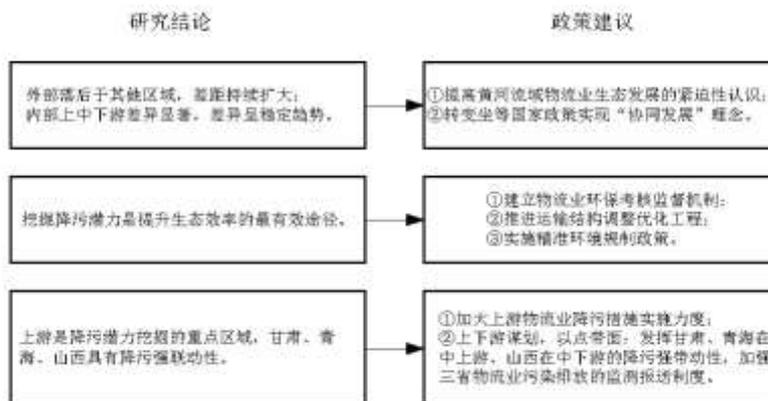


图 8 黄河流域物流业生态效率及降污潜力研究结论与政策建议对应图

(1) 从集成场微观经济动能看，黄河流域物流业生态效率呈“上游低、中游居中、下游高”的显著性差异，差异随时间呈现稳定趋势；从集成场宏观政策势能看，黄河流域物流业生态效率落后于其他区域，且落后差距随时间持续扩大，因此需要政策势能对产业生态趋势加以引导。建议：①提高黄河流域物流业生态发展的紧迫性认识。黄河流域物流业生态发展较其他区域面临更大压力和挑战，其紧迫性须引起高度重视。②转变坐等国家政策实现“协同发展”理念。各省区差异难以短时间改变，坐等政策实现“协同发展”理念需要转变，应结合自身特色，主动挖掘物流业生态发展潜力。

(2) 相较于节约资源和增加期望产出，挖掘降污潜力是提升黄河流域物流业生态效率、缩小与其他区域生态效率差距的最有效途径。建议：①建立物流业环保考核监督机制。把清洁能源使用比例、降污设施设备使用比例、车用尿素使用比例、物流降污研发技术成果转化等指标纳入物流业环保考核体制中。③实施精准环境规制政策。统筹考虑货车限行等环保规制措施，避免“一刀切”式的简单粗暴政策。

(3) 黄河上游是降污潜力挖掘的重点区域，甘肃、青海、山西具有降污强联动性。建议：①加大上游物流业降污措施实施力度。重点加强上游物流业降污政策实施力度，减少对化石能源依赖，严格管控产能过剩、污染严重的物流强相关产业转移至上游，杜绝粗放式大开发。加强上游、中游区域的物流业集成体主导的物流链建设，形成物流资源集成、功能集成、过程集成，提高物流业组织化、系统化等高级化发展动力及高质量趋势。②上下游谋划，以点带面。建立黄河流域物流业主导网链的污染物排放联防联控信息平台，发挥各省区物流业降污比较优势，以甘肃、青海带动黄河中上游省区降污潜力挖掘，以山西带动黄河中下游省区降污潜力挖掘，重点加强甘肃、青海、山西物流业污染物排放常态化、24 小时实时监测和报送制度建设。

参考文献:

[1] 丁俊发. 改革开放 40 年中国物流业发展与展望[J]. 中国流通经济, 2018(4): 3-17.

[2] 唐建荣, 杜娇娇, 唐雨辰. 环境规制下的区域物流效率可持续发展研究[J]. 经济与管理评论, 2018(5): 138-149.

-
- [3] 习近平. 在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话[J]. 求是, 2019(20): 4-11.
- [4] 董千里. 区域物流信息平台与资源整合[J]. 交通运输工程学报, 2002(4): 58-62.
- [5] 杨雪, 马粟粟, 卢亚丽. 碳排放约束下的物流效率评价——以“一带一路”背景下内陆十省市为例[J]. 生态经济, 2019(6): 66-71.
- [6] Lu M X, Xie R H, Chen P R. Green transportation and logistics performance: An improved composite index[J]. Sustainability, 2019, 11(10): 2976-2992.
- [7] 范建平, 肖慧, 樊晓宏. 考虑非期望产出的改进 EBM-DEA 三阶段模型——基于中国省际物流业效率的实证分析[J]. 中国管理科学, 2017(8): 166-174.
- [8] Rashidi K, Cullinane K. Evaluating the sustainability of national logistics performance using Data Envelopment Analysis[J]. Transport Policy, 2019, 74: 35-46.
- [9] Wang D F, Dong Q L, Peng Z M, et al. The green logistics impact on international trade: Evidence from developed and developing countries[J]. Sustainability, 2018, 10(7): 2235-2253.
- [10] 周叶, 张孟晓, 杨洁. 基于 SE-DEA 的省域物流行业生态效率研究[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2015(4): 99-106.
- [11] Long R Y, Ouyang H Z, Guo H Y. Super-slack-based measuring data envelopment analysis on the spatial-temporal patterns of logistics ecological efficiency using global malmquist index model[J]. Environmental Technology & Innovation, 2020, 18: 100770-100784.
- [12] Schaltegger S, Sturm A. Ökologische rationalität: Ansatzpunkte zur ausgestaltung von ökologieorientierten managementinstrumenten[J]. Die Unternehmung, 1990, 44(4): 273-290.
- [13] 黄建欢, 方霞, 黄必红. 中国城市生态效率空间溢出的驱动机制: 见贤思齐 VS 见劣自缓[J]. 中国软科学, 2018(3): 97-109.
- [14] Liu X L, Guo P B, Guo S F. Assessing the eco-efficiency of a circular economy system in China's coal mining areas: Energy and data envelopment analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 206: 1101-1109.
- [15] Yang L, Zhang X. Assessing regional eco-efficiency from the perspective of resource, environmental and economic performance in China: A bootstrapping approach in global data envelopment analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 173: 100-111.
- [16] 王永静, 陈增增. 天山北坡经济带农业生态效率评价及提升路径研究——基于 Super-SBM 模型和 Global-Malmquist 指数[J]. 生态经济, 2020(2): 111-117.
- [17] Egilmez G, Park Y S. Transportation related carbon, energy and water footprint analysis of U. S. manufacturing: An eco-efficiency assessment[J]. Transportation Research Part D-Transport and Environment, 2014, 32: 143-159.

-
- [18]Caiado R G G,Dias R D F,Mattos L V,et al.Towards sustainable development through the perspective of eco-efficiency:A systematic literature review[J].Journal of Cleaner Production,2017,165:890-904.
- [19]Tone K.Dealing with undesirable outputs in DEA:A slacks-based measure (SBM) approach[J].Grips Research Report Series,2003(8):44-45.
- [20]Andersen P,Petersen N C.A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis[J].Management Science,1993(39):1261-1264.
- [21]王东方,董千里.中国城市物流发展空间结构演化及影响因素[J].北京交通大学学报(社会科学版),2019(4):125-139.
- [22]Hall R E, Jones C I. Why do some countries produce so much more output per worker than others?[J]. The Quarterly Journal of Economics, 1999, 114(1):83-116.
- [23]孙涵,胡雪原,聂飞飞.空气污染物的时空演化及社会经济驱动因素研究——以长江三角洲地区为例[J].中国环境管理,2019(4):71-78.
- [24]Li L, Lei Y L, Wu S M, et al. Evaluation of future energy consumption on PM2.5 emissions and public health economic loss in Beijing[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 187:1115-1128.