

中国省域工业废水重金属 排放绩效差异研究

张家旗 苗长虹

摘要 作者基于环境数据包络分析 (DEA) 的效率测算方法, 构建考虑非期望产出的重金属排放绩效指数 (MHPI), 测算了我国 2003 年 ~ 2011 年 29 个省份的工业废水重金属排放绩效。研究发现: 受技术进步的推动, 我国大部分省份 MHPI 不断提高, 而体现追赶效应的技术效率作用不够突出, 贵州、青海、江苏、宁夏的 MHPI 则趋于下降; 我国东部、东北、中部、西部四大经济区域的 MHPI 均有所改善, 中部累计改善幅度最高, 东部、西部次之, 东北最低, 但各区域 MHPI 变化表现出趋同态势; 不考虑非期望产出的 DEA 模型高估了各省份的工业生产绩效指数 (MIPI), 将 MHPI 和 MIPI 按高、中、低组合成 9 种类型, 我国大部分省份处于中 - 中组合, 但内蒙古、辽宁、甘肃、湖北、湖南、新疆、四川呈现高 - 高组合, 河北、河南呈现高 - 中组合, 而我国东部经济发达的江苏则呈现出低 - 低组合, 西部经济相对落后的青海、宁夏呈现低 - 高组合, 贵州则呈现低 - 中组合。

关键词 工业废水重金属 重金属排放绩效指数 工业生产绩效指数
环境 DEA

[中图分类号] X821 [文献标识码] A [文章编号] 2095-851X (2015) 03-0029-15

一、引言

近年来, 伴随着我国经济的快速发展, 水体和土壤遭受重金属污染的事件迅速增

【基金项目】 国家自然科学基金项目“中部地区承接产业转移的驱动机制与环境效应” (批准号: 41430637); 国家自然科学基金项目“中国省内区域差异的时空分析: 经济转型、产业重组与空间集聚” (批准号: 41329001)。

【作者简介】 张家旗 (1988 -), 中国科学院南京地理与湖泊研究所博士研究生, 邮政编码: 210008; 苗长虹 (1965 -), 河南大学黄河文明与可持续发展研究中心教授、博士生导师, 本文通讯作者, 邮政编码: 475001。

致谢: 感谢审稿专家匿名评审, 但文责自负。

多,重金属污染已成为受人关注的社会公害。重金属污染主要来源于工业污染,其次是交通污染和生活垃圾污染。工业污染大多通过废渣、废水、废气排入环境,在植物、动物和人体中富集,从而对环境和人的健康造成很大危害,其中工业废水排放的影响尤其突出(吴文俊、蒋洪强,2012)。作为重金属污染的重要来源,工业废水重金属的超标排放对生态环境及人们的生命健康造成了巨大危害。我国大部分省份仍处于工业化加速发展阶段,工业仍是经济发展的重要支撑,但金属冶炼、电镀、电子及通讯设备制造和化工等许多行业都会排放含大量重金属的工业废水(Dean et al., 1972; Fakayode and Onianwa, 2002)。控制工业废水重金属污染已经成为刻不容缓的问题。

国家和地方政府对重金属污染问题已日益重视,相关学者也对不同地区重金属污染的现状、危害及修复措施进行了研究和探讨。然而,由于研究范围和时段、研究具体内容、采样点和评价方法等不同,这些研究难以用统一口径来反映我国工业废水重金属污染的总体水平、排放绩效及区域特征,因此有必要寻找一种新的方法来研究重金属排放问题。目前的环境绩效研究主要可以分为单要素环境绩效评估与综合环境绩效评估,前者主要集中于对CO₂排放绩效的研究,方法多使用数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA)及其扩展模型;后者则通过参照不同国家、地区和组织发布的生态环境评价指标体系,综合选取多要素环境指标,通过模糊综合评价模型、主成分分析法、人工神经网络等来对企业或地区的环境绩效做出评价(唐建荣、张承焯,2006;黄和平等,2010)。其中,以CO₂排放作为非期望产出的DEA模型为工业废水重金属排放绩效评估提供了一种可以借鉴的研究路径。如Zhou等(2010)通过构建Malmquist CO₂排放绩效指数,测算了全球碳排放量最高的18个国家的碳排放绩效,发现整体上CO₂排放绩效在研究期内增长了24%,且主要由技术进步所驱动。刘玉飞等(2013)利用含有非期望产出的DEA模型构建了工业碳排放绩效指数,测度了2005年~2010年我国东部、中部、西南、西北及东北五大区域的工业碳排放绩效水平。王伟群等(2010)构建了研究CO₂排放绩效动态变化的Malmquist指数,测度了我国28个省份1996年~2007年的CO₂排放绩效。屈小娥(2012)在全要素框架下基于DEA模型测算了1995年~2010年我国30个省市区的CO₂排放效率,发现各省市区CO₂排放效率差异显著,且这种差异有进一步拉大的趋势。除此之外,叶维丽等(2014)将非期望产出作为投入指标构造了规模可变的DEA模型,并以南京市280家企业的化学需氧量(Chemical Oxygen Demand, COD)排放指标初始分配为例进行分析,结果表明这一分配方法使得企业可得到的排放指标与其环境效率相关,将对企业治污起到激励作用。已有研究在模型扩展和经验积累等方面取得了丰富成果,为本文从排放绩效角度研究工业废水重金属提供了有益的参考。

工业废水重金属排放属于非期望产出,它和碳排放等其它非期望产出没有本质区别,但也有所不同。通过工业废水排放到环境中的重金属主要富集于河流底泥,适当条件下底泥中的重金属会重新释放进而产生二次污染,其污染具有很强的区域性,而CO₂的排放则影响范围较广。此外,工业废水重金属的排放量数据不必像CO₂那样

需经过换算得到，相对更加可靠。因此将测算碳排放绩效的 DEA 方法应用到重金属排放绩效的研究中来，也有一定的创新意义。鉴于此，本文利用含有非期望产出的环境 DEA 方法，测算我国近年来各省份工业废水重金属排放的绩效特征，并分析排放绩效的区域差异，为国家根据各地具体情况制定相应解决方案提供参考。

二、环境 DEA 及 Malmquist 重金属排放绩效指数的构建

在众多能源环境模型中，DEA 作为一种非参数方法被广泛地应用于绩效评价。在传统的 DEA 模型中，投入和产出被假设有强的可处置性，即技术关系 T 满足：若 $(x, y) \in T$ (x, y 分别表示投入和产出)，且 $x' \geq x$ 或 $y' \leq y$ ，则 $(x', y) \in T$ 或者 $(x, y') \in T$ 。然而，这在真实的生产过程中并不总是正确的，例如有非期望产出的时候。鉴于此，相关学者提出了很多方法来将非期望产出纳入到 DEA 模型中 (Scheel, 2001)。这些方法总结起来可以分为两类，第一类仍然运用传统的 DEA 模型，但对数据做了一定的转换及变形 (Hailu et al., 2001; Seiford et al., 2002)，这些方法往往与现实的生产过程不符；第二类不对数据做变形处理，但技术关系是基于弱的可处置性 (Färe et al., 1989)。在 DEA 框架中，弱可处置性技术关系也被称为环境 DEA 技术 (Färe and Grosskopf, 2004)，其特征可以用公式 (1) 来描述：

$$Te = \left\{ \begin{array}{l} (x, y, u) : \sum_{k=1}^k a_k x_{nk} \leq x_n, n = 1, 2, \dots, N \\ \sum_{k=1}^k a_k y_{mk} \geq y_m, m = 1, 2, \dots, M \\ \sum_{k=1}^k a_k u_{jk} = u_j, j = 1, 2, \dots, J \\ a_k \geq 0, k = 1, 2, \dots, K \end{array} \right. \quad (1)$$

其中 x, y, u 分别表示投入、期望产出和非期望产出。 a_k 表示每一个横截面观测值的权重，其取值为非负，表明生产技术规模报酬不变。和传统 DEA 模型中技术关系不同的是， Te 中不等式的约束关系及非期望产出等式的约束关系表明了非期望产出的弱可处置性及两类产出的零结合性 (Färe et al., 2005)。在包含非期望产出的 DEA 模型中 Te 更加接近真实的生产过程，因此其在生产率及环境绩效建模等能源环境问题研究中得到了广泛的应用 (Boyd et al., 2002; Zaim, 2004; Picazo-Tadeo et al., 2005)。

通过结合环境 DEA 技术与非参数 Malmquist 生产指数 (Malmquist Productivity Index, MPI) 来构造 Malmquist 重金属排放绩效指数 (Malmquist Heavy Metal Emission Performance Index, MHPI) (Malmquist, 1953; Caves et al., 1982; Färe et al., 1994)。根据 Tyteca (1996) 提出的非期望产出导向的 DEA 效率指数的思想，定义重金属排放的 Shephard 投入距离函数 (Shephard, 1970)，如式 (2) 所示，用来计算

重金属排放的最大可能消减量,以测度每个决策单元 (Decision Making Unit, DMU) 在特定时间段内的重金属排放绩效。假设 $D_h^t(x_i^t, y_i^t, u_i^t)$ 和 $D_h^s(x_i^s, y_i^s, u_i^s)$ 分别是第 i 个 DMU 在 t 和 s 时期生产技术下基于其 t 时期投入和产出的 Shephard 重金属距离函数 (假设 $s > t$), 同时假设 $D_h^t(x_i^s, y_i^s, u_i^s)$ 和 $D_h^s(x_i^t, y_i^t, u_i^t)$ 分别是第 i 个 DMU 在 t 和 s 时期生产技术下基于其 s 时期投入和产出的 Shephard 重金属距离函数。根据 Färe 等 (1994) 运用相邻时期两个 Malmquist 生产率指数的几何平均值来计算 Malmquist 指数的方法, 取相邻时期两个 Malmquist 指数值的几何平均值来计算 MHPI。其计算公式如式 (3)。这样 $MHPI_i(t, s)$ 便可以用来测度不同 DMU 从 t 时期到 s 时期的重金属排放绩效变化, $MHPI_i(t, s)$ 大于 1、等于 1 和小于 1 分别表明重金属排放绩效提升、不变和下降。

$$D_h(x, y, u) = \sup \{ \theta : (x, y, u/\theta) \in Te \} \tag{2}$$

$$MHPI_i(t, s) = \left[\frac{D_h^t(x_i^t, y_i^t, u_i^t)}{D_h^t(x_i^s, y_i^s, u_i^s)} * \frac{D_h^s(x_i^t, y_i^t, u_i^t)}{D_h^s(x_i^s, y_i^s, u_i^s)} \right]^{1/2} \tag{3}$$

根据 Färe 等人的研究, MHPI 也可以写成如式 (4)、式 (5) 的形式, 即被分解为技术进步的变化 ($TECHCH_i(t, s)$) 和技术效率的变化 ($EFFCH_i(t, s)$)。TECHCH 测度了边界转换效应, 即量化了第 i 个 DMU 从 t 时期到 s 时期生产技术的变化; EFFCH 测度的是追赶效应, 反映了第 i 个 DMU 的重金属排放绩效在 t 时期和 s 时期的生产前沿的变化 (Färe et al., 1994)。

$$EFFCH_i(t, s) = \frac{D_h^t(x_i^t, y_i^t, u_i^t)}{D_h^s(x_i^s, y_i^s, u_i^s)} \tag{4}$$

$$TECHCH_i(t, s) = \left[\frac{D_h^s(x_i^t, y_i^t, u_i^t)}{D_h^t(x_i^t, y_i^t, u_i^t)} * \frac{D_h^s(x_i^s, y_i^s, u_i^s)}{D_h^t(x_i^s, y_i^s, u_i^s)} \right]^{1/2} \tag{5}$$

为了测度 MHPI 以及它的两个贡献部分, 需要计算四个 Shephard 重金属距离函数, 即 $D_h^p(x_i^q, y_i^q, u_i^q)$, $p, q \in \{s, t\}$ (其中 p, q 分别代表不同的时期, 且 $p < q$)。结合环境 DEA 技术 (式 (1)) 和 Shephard 投入距离函数 (式 (2)), 通过解决式 (6) 中的 DEA 模型来求解 $D_h^p(x_i^q, y_i^q, u_i^q)$, 其中, z_i 代表每一个横截面观测值的权重。

$$\begin{aligned} D_h^p(x_i^q, y_i^q, u_i^q)^{-1} &= \min \theta \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^I z_i x_i^p &\leq x_i^q \\ \sum_{i=1}^I z_i y_i^p &\geq y_i^q \\ \sum_{i=1}^I z_i u_i^p &= \theta u_i^q \\ z_i &\geq 0, i = 1, 2, \dots, I \end{aligned} \tag{6}$$

三、各省份 MHPI 分析

根据以上构造的 MHPI，计算出相应时间段内各个 DMU 的重金属排放绩效值。由于海南和西藏数据缺失过多，因此本文以我国 34 个省级行政区中的 29 个省市自治区作为 DMU（不包括海南、西藏、香港、澳门和台湾）。研究时段为 2003 年~2011 年。

（一）投入产出变量的选取及数据来源

从以往学者在研究能源环境效率问题中所选取的投入产出指标来看，最为广泛使用的投入指标有劳动力、资本存量以及能源消耗量，期望产出为总产值或增加值，而非期望产出即为污染物的排放指标。由于受到数据可得性的约束，各指标值有时会采用不同的替代变量。如劳动力指标可以用年末从业人员或者从业人员年均人数来表示，更细致的需要计算劳动力的质量（朱承亮等，2012）；而资本存量的计算更加复杂，大多采用永续盘存法来进行估算，其中比较有代表性的有张军等（2004）、单豪杰（2008）的研究，但由于具体计算过程中处理数据的方法不同，得到的结果也各不相同。因此，也有许多学者采用固定资产净值年平均余额来作为资本存量的替代变量（庞瑞芝等，2001；唐玲、杨正林，2009；涂正革、刘磊珂，2011；刘玉飞等，2013）。

参照前人的研究，根据数据的可得性及研究问题的性质，投入变量使用劳动力、资本及能源消耗量，期望产出变量使用总产值，非期望产出变量使用 5 种重金属的综合等标污染负荷值来表示。具体使用指标如下：

劳动力变量采用的指标为各地区规模以上工业企业从业人员年平均人数，反映的是劳动力数量增长的信息。虽然不同素质劳动力在经济增长中的重要性不同，但由于劳动种类的繁杂和测度的繁琐，并且研究的重点为污染物的排放效率而并非经济的增长，因此在此并没有将劳动力的质量因素考虑进来。

资本变量采用的指标为规模以上工业企业固定资产净值年平均余额，以此来近似代替资本存量。因为关于资本存量的核算虽然较多，但各个学者所得的结果不一，且关于工业资本存量的核算更是鲜有前例。所用固定资产年平均余额数据经过固定资产投资价格指数进行平减处理，以统一口径。

能源变量采用的指标为工业能源终端消费量（实物量），包括原煤、洗精煤、其它洗煤、焦炭、焦炉煤气、其它煤气、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气、炼厂干气、天然气、热力、电力、其它能源共 17 种主要能源。按照中国能源统计年鉴中各种能源折算标准煤的系数，将以上 17 种能源折算为“万吨标准煤”单位，以它们的加总作为工业能源终端消费量，近似表示工业的能源消费量。

期望产出变量采用规模以上工业企业总产值来表示，数据经过世行发布的 GDP 平减指数进行平减处理。非期望产出变量采用汞、镉、六价铬、铅、砷 5 种重金属的等标污染负荷值之和来表示，以代表各省份每年工业废水重金属的总排放强度。传统

的赋权重方法如熵权法、变异系数法等难以真正反映各污染物的综合污染水平,而等标负荷法(史宝忠、何金凤,1991;刘天齐等,1994;刘常海、张明顺,1994)通过严格制定的环境标准将各污染物换算到统一计算口径下,加总的结果能够更加客观真实地反映一个地区的重金属排放水平。

以上工业从业人员年平均人数、工业固定资产净值年平均余额以及工业总产值的数据来自《中国统计年鉴》以及各省统计年鉴;工业能源终端消费量(实物量)中的各种能源数据来源于《中国能源统计年鉴》;工业废水中5种重金属的排放量数据来源于《中国环境统计年鉴》以及各省环境统计公报。相关数据的统计性描述见表1。

表1 2003年~2011年投入产出指标统计描述

投入产出指标	单位	均值	中值	最小值	最大值	标准差
工业总产值	亿元	14267.62	7828.35	241.59	100312.22	17736.05
重金属等标负荷	$10^6 \text{m}^3/\text{a}$	738.89	775.51	1.00	789.28	108.12
劳动力	万人	269.09	154.01	13.77	1568.00	293.14
资本存量	亿元	4119.03	2867.92	326.31	22198.17	3812.36
能源	万吨标准煤	1547.54	1111.94	168.35	6196.39	1157.65

(二) 重金属排放绩效动态变化的总体分析

2003年~2011年我国各省份的平均MHPI及其分解情况如表2左半部分所示,MHPI的效率变化部分和技术进步部分分别记为Effch和Techch。由表2可知,MHPI有所改善的省份有25个,占有研究单元的86.21%,其中改善超过10%的省份依次为内蒙古、辽宁、湖南、甘肃、河北、四川、湖北、新疆和河南,MHPI有所下降的4个省份为贵州、青海、江苏和宁夏,绝大多数省份MHPI的改善说明我国工业废水重金属的排放绩效整体上在不断提高。其中,MHPI上升幅度最大的内蒙古达到了18.2%,而下降最大的宁夏则达到9.2%,离散程度较大,表明我国29个省份的MHPI改善程度很不均匀,个体间的差异较大。从各个省份MHPI变化的分解来看,重金属排放效率有所改善的25个省份中,有24个取得了技术进步,23个取得了技术效率的提高,两者同时得到改善的省份有22个,说明MHPI的改善同时来源于技术的追赶效应及技术进步的促进作用。具体来看,虽然技术的追赶效应更加平稳地促进了MHPI的改善,但其作用不够明显。MHPI的变化更多地受到技术进步变化的影响,技术进步的上升或下降是导致MHPI变化的主要原因。因此,我国各省份在加强技术攻关的同时,也要大力促进区域间的合作与技术交流,提高管理水平和资源综合利用效率。若相关技术和经验能够在区域间更加有效地流动,MHPI的改善程度将会有进一步提升。

表 2 2003 年~2011 年中国各省(市、区) MHPI、MIPI 及其分解和排名

地 区	MHPI				MIPI			
	Effch	Techch	MHPI	MHPI 排名	Ieffch	Itechch	MIPI	MIPI 排名
北 京	1.007	1.082	1.090	12	1.020	1.107	1.129	20
天 津	1.010	1.066	1.077	14	1.025	1.101	1.129	21
河 北	1.033	1.084	1.120	5	1.042	1.093	1.139	16
山 西	1.029	1.045	1.075	16	1.045	1.090	1.139	17
内 蒙 古	1.069	1.105	1.182	1	1.112	1.125	1.251	1
辽 宁	1.058	1.089	1.152	2	1.060	1.088	1.153	10
吉 林	1.033	1.060	1.095	10	1.047	1.103	1.154	9
黑 龙 江	1.033	1.034	1.067	18	1.031	1.102	1.136	18
上 海	1.000	1.068	1.068	17	1.000	1.076	1.076	26
江 苏	0.998	0.933	0.931	28	0.998	0.933	0.932	29
浙 江	0.989	1.063	1.051	21	0.989	1.067	1.055	28
安 徽	1.045	1.034	1.080	13	1.069	1.075	1.149	13
福 建	1.022	1.026	1.049	22	1.030	1.054	1.086	25
江 西	1.037	1.019	1.057	20	1.092	1.076	1.175	6
山 东	1.018	1.074	1.093	11	1.019	1.077	1.097	24
河 南	1.034	1.069	1.105	9	1.043	1.075	1.122	23
湖 北	1.058	1.056	1.118	7	1.072	1.099	1.179	4
湖 南	1.070	1.076	1.150	3	1.068	1.080	1.153	11
广 东	1.000	1.063	1.063	19	1.000	1.064	1.064	27
广 西	1.050	1.025	1.076	15	1.054	1.085	1.143	15
重 庆	1.023	1.006	1.030	24	1.045	1.078	1.127	22
四 川	1.045	1.070	1.119	6	1.056	1.092	1.153	12
贵 州	1.035	0.950	0.984	26	1.022	1.107	1.131	19
云 南	1.008	1.034	1.043	23	1.022	1.120	1.145	14
陕 西	1.022	0.984	1.006	25	1.058	1.094	1.158	8
甘 肃	1.063	1.064	1.131	4	1.082	1.112	1.202	3
青 海	1.000	0.940	0.940	27	1.087	1.136	1.234	2
宁 夏	0.997	0.911	0.908	29	1.056	1.115	1.177	5
新 疆	1.003	1.105	1.108	8	1.033	1.132	1.170	7

(三) 重金属排放绩效动态变化的区域差异与收敛分析

由于不同省份间生产技术、区位环境和管理体制的差异性与联系性,我国工业废水重金属排放绩效的动态变化呈现出一定的区域特征。表 3 计算了我国四大经济区(即东部、中部、西部及东北地区)的 MHPI 及其分解的累计值,即各区域所包含省份 MHPI 改善程度的总和, Ceffch、Ctechch 和 CMHPI 分别表示技术效率、技术进步和 MHPI 的累计改善值。可以发现,在研究期内,我国四大经济区域的 MHPI 均有所

改善。其中，中部 MHPI 的累计改善幅度最大，达到 58.5%；东部、西部分别次之，但累计改善幅度也均在 50% 及以上；东北累计改善幅度最低，为 31.4%。

表 3 四大经济区域 MHPI 及其分解的累计值

地区	累计值		
	Ceffch	Ctechch	CMHPI
东部	1.077	1.459	1.542
西部	1.315	1.194	1.527
中部	1.273	1.299	1.585
东北	1.124	1.183	1.314

从 MHPI 的分解来看，技术效率和技术进步的提高对四大区域的重金属排放绩效的改善均起到了促进作用，但在各个区域的贡献程度不同。其中东部地区主要依靠技术进步的提高，而西部地区则更多地依赖技术追赶效应，中部地区和东北地区技术效率的改善与技术进步的贡献作用相当。这一格局与区域社会经济及技术发展水平密切相关。东部地区经济发展和科学技术水平都处于领先地位，排放绩效的改善大部分依赖技术进步的推动；而西部地区受经济发展水平的制约，技术发展相对落后，排放绩效的提高主要依赖于技术的学习追赶以及资源利用率的提高；中部地区和东北地区的经济发展及技术水平处于中间地位，排放绩效的提高来源于技术效率和技术进步的共同促进作用，且由于中部地区大多数省份有着相对较多的污染排放基础，在我国对重金属污染的防治力度逐渐增大的情况下，其排放绩效的提升较为明显。

为分析重金属排放效率区域差异的变化趋势，作者借助经济收敛理论对各地区 MHPI 的收敛性进行检验。经济收敛是指落后经济由于具有较高的资本边际产出，其增长速度将比发达经济增长速度快，从而差距逐渐缩小，经济趋向稳定的动态过程（刘强，2001）。经济收敛理论常用于经济增长的收敛分析以及全要素生产效率的收敛分析（林光平等，2005；孙传旺等，2010），作者将其应用于重金属排放绩效的收敛性分析。实证研究中，根据研究的具体问题，常用的检验方法有 σ -收敛检验、 β -绝对收敛检验、 β -条件收敛检验以及俱乐部收敛检验。由于本文试图在绝对意义上探究重金属排放绩效的动态变化趋势，因此选取 β -绝对收敛进行实证检验。

考察区域间重金属排放绩效动态变化的 β -收敛模型如下：

$$\frac{1}{t} \log \frac{y_{i,t}}{y_{i,0}} = c - \frac{1 - e^{-\beta t}}{t} \log y_{i,0} + u_{i,t} \quad (7)$$

上式中 $y_{i,0}$ 和 $y_{i,t}$ 分别表示 i 地区基期和 t 时期的重金属排放绩效指数， $\frac{1}{t} \log \frac{y_{i,t}}{y_{i,0}}$ 表示 i 地区从基期到 t 时期重金属排放绩效的年均增长率， $\log y_{i,0}$ 表示 i 地区基期重金属排放绩效的绝对值， c 为常数项， $u_{i,t}$ 为随机扰动项。根据式（7）建立回归模型如下：

$$r_{i,t} = a + b \log y_{i,0} + u_{i,t} \quad (8)$$

上式中， $r_{i,t} = \log \frac{y_{i,t}}{y_{i,0}}$ ， a 为常数项， $b = e^{-\beta} - 1$ ， $u_{i,t}$ 为随机扰动项。若回归系数 b 为负值，则表明存在 β - 绝对收敛，说明各地区重金属排放绩效的增长率与其初始水平成反向关系，且 b 的绝对值越大，收敛的速度就越快。

利用前面所得各省市 2003 年~2011 年重金属排放绩效指数构造面板数据集，结合公式 (7) 及 (8)，用 Eviews 软件对数据进行回归分析，经模型设定形式的 Hausman 检验确定使用固定效应的回归模型，估算结果如表 4 所示。

表 4 全国及四大区域的 MHPI 收敛性分析结果

	系数 b	Std. Error	t-Statistic	Pro	Adjusted R^2
全国	-0.93588 ***	0.054100	-27.3575	0.0000	0.8160
东部	-0.98424 ***	0.027467	-36.1049	0.0000	0.9516
中部	-1.08016 ***	0.124461	-7.1846	0.0000	0.5249
西部	-0.52476 ***	0.154567	-3.26513	0.0036	0.1527
东北	-0.61343 **	0.254187	-2.48237	0.0241	0.2443

注：***、** 和 * 分别表示 1%、5% 和 10% 的显著性水平。

由表 4 可见，在 5% 的显著性水平下全国及四大区域范围内的回归系数 b 均为负值，说明存在绝对 β 收敛。从拟合优度来看，西部和东北地区的拟合优度较低，即在研究期内的线性关系不很显著，属于 β - 弱绝对收敛；而中部、东部及全国的拟合优度均较高，即在研究期内存在显著的线性关系，属于 β - 强绝对收敛。收敛性的存在表明全国及四大区域之间重金属排放绩效存在着落后者追赶先进者的追赶效应，绩效水平低的地区增长率要高于绩效高的地区，最终各地区的重金属排放绩效水平有趋同的趋势。从追赶效应的强弱即系数 b 的绝对值大小来看，中部地区的绩效收敛速度最快，东部次之，东北再次之，而西部地区趋同性的表现最弱，这也印证了上文技术效率所表现出的弱追赶效应这一结论。要强化落后地区对先进地区的追赶效应，缩小各地区之间的重金属排放绩效差异，仍需采取一系列政策措施，促进地区之间在资源高效利用、重金属减排技术以及先进管理制度理念等方面的交流，以期在全国范围内有效提升重金属的排放绩效。

四、工业生产绩效与重金属排放绩效的组合分析

为了与在没有重金属排放约束下的工业生产绩效做对比，本文按照传统的 MPI 指数方法测算以劳动力、资本存量和能源为投入指标，工业总产值为产出指标的工业生产绩效指数 (Malmquist Industry Performance Index, MIPI)，将 MIPI 的效率变化部分和技术进步部分分别记为 Ieffch 和 Itchch。

表2右半部分为2003年~2011年我国各省份的平均MIPI及其分解情况,可以看出,在没有重金属排放约束下的工业生产绩效均比环境约束下的工业生产绩效要高,也就是说传统的不考虑非期望产出的DEA模型高估了工业的发展成绩。这是因为在传统的DEA模型中没有加入非期望产出最小化的约束条件,即没有考虑环境污染的影响因素。当然,由于本文研究的非期望产出只考虑了重金属这一项环境指标,并未将废气、废水、固体废弃物以及噪声等污染纳入工业生产绩效的考核之中,这也是今后核算绿色GDP的一个方向。为了更加清晰地区分环境约束下各省份的工业经济发展情况,将它们按环境绩效和工业绩效分别分为低、中、高三类,MIPI取值范围按0~1、1~1.1、1.1~1.19分别表示环境绩效的低、中、高水平,对应于重金属排放绩效的退步、改善和较大改善;MIPI的取值范围按0~1、1~1.15、1.15~1.26分别表示工业绩效的低、中、高水平,同样对应于工业绩效的退步、突出和非常突出。具体分类结果如图1所示。

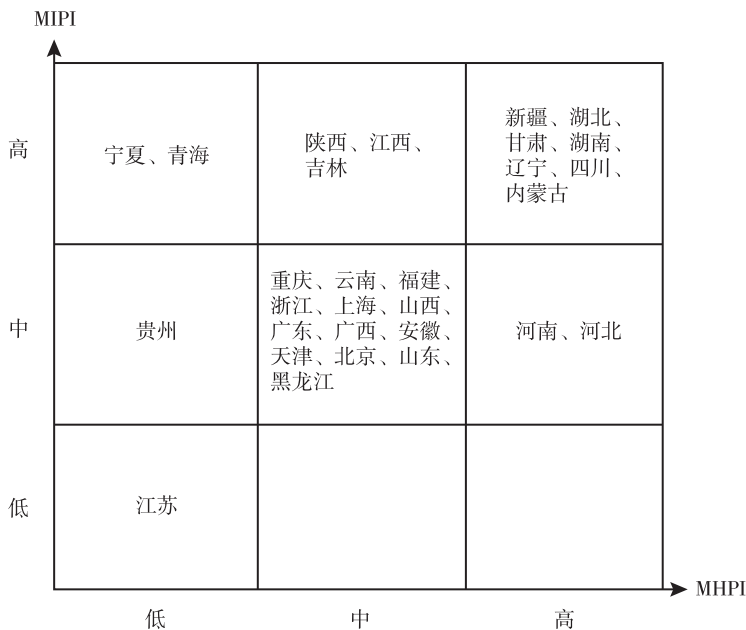


图1 工业绩效与重金属排放绩效组合分类结果

由图1中分类结果可知,从发展的角度来看,就工业废水重金属排放这一环境要素来说,大多数省市的工业发展属于环境改善型,只有青海、宁夏、贵州和江苏四省份的工业发展是环境退步型。大部分省份处于环境改善且工业绩效突出这一中间水平,其数量占研究省份的41.37%。工业绩效非常突出但处于环境退步的省份有青海和宁夏,其工业发展与环境表现极不协调。青海与宁夏的工业发展绩效均处于各省份前列,但其环境绩效表现却处于垫底地位,与其周边同处于西部的甘肃、新疆相比,

环境绩效不容乐观。中国自 2000 年实施西部大开发以来，西部地区工业增加值占生产总值的比重迅速提升，一度超过其他三个经济区。但由于受到资源禀赋、产业基础以及发展阶段的影响，近年来西部地区重化工业和原料工业规模迅速扩张，资源消耗高、三废排放量大的特征十分明显。因此，鉴于西部地区各省份之间的工业发展和环境表现之间的差别，不能延续过去的普惠制办法，而应该区别对待、分类指导，针对西部地区不同类型的区域实行差别化的国家支持政策，提高政策的实施效果。工业绩效退步且环境退步的省份只有江苏一个，同时江苏也是工业发展绩效退步的唯一省份。具体来看其原因主要在于技术创新能力的制约，如何提高本土企业消化吸收新技术、提高自主创新能力，是江苏省今后面临的一个严峻挑战。江苏属于典型的资源短缺型省份，加之资源配置不合理，使得近年来其轻工、机械、纺织等部分行业存在着严重的产能过剩。江苏省应根据市场需求合理分配生产能力。作为东部沿海的发达省份，其在工业发展过程中相对较早地遇到了环境及资源问题，工业能耗一度达到发达国家的 7 倍，如何抓住国家节能减排、集约发展的机遇解决其资源环境与经济发展的矛盾，将是江苏省能否走环境友好型工业化道路的重大考验。

为了进一步认识各类型省份工业发展中重金属排放绩效的变化情况，分别在 MHPI 与 MIPI 的高-高、中-高、中-中、高-中、低-高、低-中、低-低组合中选取四大区域的代表性省份，即辽宁、江西、上海、河南、青海、贵州和江苏，将它们 MHPI 的历年变化情况进行对比，如图 2 所示。

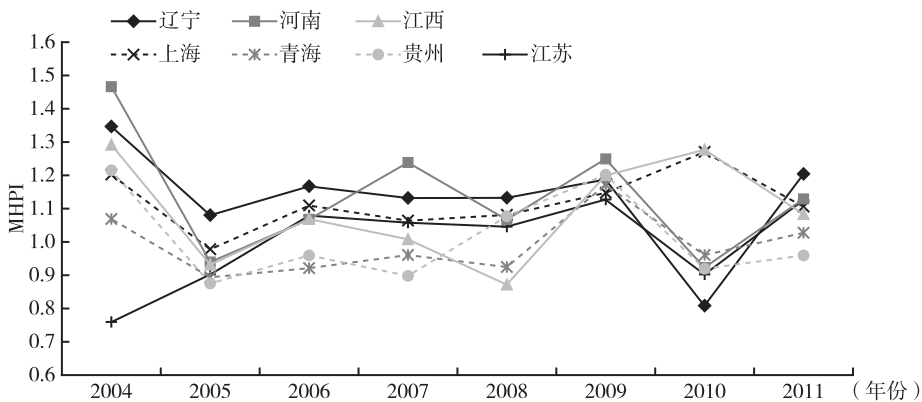


图 2 不同类型省份的 MHPI 变化情况

由图 2 可知，不同类型省份的重金属排放绩效变化情况各有特点。对于高-高组合的辽宁来说，其重金属排放绩效虽有一定程度的波动，但大部分年份保持着较高的水平，处于持续上升的状态；而属于高-中组合的河南及中-高组合的江西则处于不断波动的状态，且波动幅度较大；属于中-中组合的上海变化较小，且大部分年份处于进步的状态；青海作为工业发展与重金属排放绩效反差最大的省份，其 MHPI 除了个别年份有略微改善，其余年份均为平稳的退步状态，但退步的幅度不大；属于低-

中组合类型的贵州的 MHPI 变化情况同河南相似,均呈现出不断波动的状态,且其波动频率要高于江西,表现出更为强烈的不稳定性;而江苏省作为唯一工业绩效退步的低-低组合类型,虽然其 MHPI 在平均水平上来看是退步的,但具体来看其 MHPI 在经历了 2004 年~2005 年的倒退以后,接下来的年份基本上保持相对稳定的改善趋势,尽管改善的幅度相对较小。

五、结论及政策建议

(一) 结论

在研究期内,我国各省份工业废水重金属排放绩效的变化更多地是受技术进步的影响,而技术追赶效应的影响不够突出,反映出技术、管理经验等在各地区之间的流动不够顺畅,技术学习有待进一步提高。整体来看,我国工业废水重金属的排放正在朝环境友好的方向发展。

从我国四大经济区的 MHPI 及其分解的累计值情况来看,各区域的 MHPI 均有所改善,其中,中部 MHPI 的累计改善幅度最高,东部、西部分别次之,东北累计改善幅度最低。从 MHPI 的分解来看,技术效率和技术进步的提高均对四大区域重金属排放效率的改善起到了促进作用,但在各个区域的贡献程度有所不同。其中东部地区主要依靠技术进步的提高得到了排放效率的改善,而西部地区则更多地依赖技术追赶效应得到了排放效率的提高,中部地区和东北地区技术效率的改善与技术进步的贡献作用相当。运用 β -绝对收敛理论的研究方法对四大经济区域重金属排放效率差异变化趋势的分析结果表明,西部和东北地区属于 β -弱绝对收敛,而中部、东部属于 β -强绝对收敛,表明四大区域之间重金属排放绩效存在着落后者追赶先进者的追赶效应,绩效水平低的地区增长率要高于相应绩效高的地区,最终各地区的重金属排放绩效水平有趋同的趋势。

与传统的 DEA-Malmquist 指数法测算的工业生产绩效指数比较结合分析,发现传统的不考虑非期望产出的 DEA 模型高估了工业的发展绩效。结合两种算法的结果,将各省份按工业发展绩效和重金属排放绩效分类后发现,大多数省份的工业发展就重金属排放来说属于环境改善型,只有青海、宁夏、贵州和江苏四省份的工业发展是环境退步的,且江苏省的工业发展绩效同样有一定程度的退步,而内蒙古在环境绩效和工业绩效方面均为领先者。大部分省份处于环境改善且工业绩效突出这一中间水平,说明我国在工业发展过程中重金属污染物的排放已逐步受到控制。具体来看,不同类型省份的 MHPI 变化分别呈现出持续改善、持续恶化及不断波动等 3 种类型。

(二) 政策建议

研究表明,因地制宜地制定重金属减排政策十分必要。不同省份的工业废水重金属排放绩效不同。从整体上看,需要对重金属排放绩效有所下降的青海、宁夏、贵州和江苏四省份有针对性地制定相关环境政策,进一步深入挖掘其环境绩效退步的原因,有针对性地实施相应的解决方案。具体来看,有些省份的重金属排放绩效主要

受技术进步的影响,有的则受技术效率的制约较多,前者应该把目标放在增强“造血”功能上,而后者暂时要增加“输血”来源。政府应采取相应措施鼓励全国环保一盘棋,杜绝由于规制漏洞而引发省际“污染天堂”效应。特别是对于跨界污染较易发生的工业废水重金属,应积极引导先进技术及管理经验在地区间形成自由流动,通过财政补贴激励先进技术在区域及行业间的转移,缩小环境效率的差异,取得技术创新整体上的收益最大化。

参考文献

- 黄和平、伍世安、智颖飙等(2010):《基于生态效率的资源环境绩效动态评估——以江西省为例》,《资源科学》第5期,第924~931页。
- 林光平、龙志和、吴梅(2005):《我国地区经济收敛的空间计量实证分析:1978-2002年》,《经济学(季刊)》第S1期,第67~82页。
- 刘常海、张明顺(1994):《环境管理》,北京:中国环境科学出版社,第63页。
- 刘强(2001):《中国经济增长的收敛性分析》,《经济研究》第6期,第70~77页。
- 刘天齐、孔繁德、刘常海等(1994):《城市环境规划规范及方法指南》,北京:中国环境科学出版社,第43~51页。
- 刘玉飞、石齐、刘聪(2013):《区域间工业碳排放绩效差异的再检验——基于中国30个省市面板数据的研究》,《湖南商学院学报》第1期,第23~28页。
- 庞瑞芝、李鹏、路永刚(2011):《转型期间我国新型工业化增长绩效及其影响因素研究——基于“新型工业化”生产力视角》,《中国工业经济》第4期,第64~73页。
- 屈小娥(2012):《中国省际全要素CO₂排放效率差异及驱动因素——基于1995-2010年的实证研究》,《南开经济研究》第3期,第128~141页。
- 史宝忠、何金凤(1991):《环境影响评价理论方法与实践》,西安:陕西科学技术出版社,第59~64页。
- 孙传旺、刘希颖、林静(2010):《碳强度约束下中国全要素生产率测算与收敛性研究》,《金融研究》第6期,第17~33页。
- 单豪杰(2008):《中国资本存量K的再估算:1952-2006年》,《数量经济技术经济研究》第10期,第17~31页。
- 唐玲、杨正林(2009):《能源效率与工业经济转型:基于中国1998-2007年行业数据的实证分析》,《数量经济技术经济研究》第10期,第34~48页。
- 唐建荣、张承焯(2006):《基于BP神经网络的企业环境绩效评价》,《统计与决策》第22期,第161~163页。
- 涂正革、刘磊珂(2011):《考虑能源环境因素的中国工业效率评价——基于SBM模型的省级数据分析》,《经济评论》第2期,第55~65页。
- 王伟群、周鹏、周德群(2010):《我国二氧化碳排放绩效的动态变化、区域差异及影响因素》,《中国工业经济》第1期,第45~54页。
- 吴文俊、蒋洪强(2012):《我国工业废水重金属排放的等标负荷特征分析》,《环境科学与技术》第11期,第180~185页。
- 叶维丽、文字立、郭默等(2014):《基于数据包络分析的水污染物排放指标初始分配方法与

案例研究》，《环境污染与防治》第10期，第102~105页。

张军、吴桂英、张吉鹏（2004）：《中国省际物质资本存量估算：1952-2000》，《经济研究》第10期，第35~44页。

朱承亮、安立仁、师萍等（2012）：《节能减排约束下我国经济增长效率及其影响因素——基于西部地区和非期望产出模型的分析》，《中国软科学》第4期，第106~116页。

Boyd, G. A., G. Tolley, and J. Pang (2002), "Plant Level Productivity, Efficiency, and Environmental Performance of the Container Glass Industry", *Environmental and Resource Economics*, 23(1), pp. 29-43.

Caves, D. W., L. R. Christensen, and W. E. Diewert (1982), "Multilateral Comparisons of Output, Input and Productivity Using Index Numbers", *The Economic Journal*, 92(365), pp. 73-86.

Dean, J. G., F. L. Bosqui, and K. H. Lanouette (1972), "Removing Heavy Metals from Waste Water", *Environmental Science and Technology*, 6(6), pp. 518-522.

Fakayode, S. and P. Onianwa (2002), "Heavy Metal Contamination of Soil, and Bioaccumulation in Guinea Grass (*Panicum maximum*) Around Ikeja Industrial Estate", *Environmental Geology*, 43(1), pp. 145-150.

Färe, R. and S. Grosskopf (2004), "Modeling Undesirable Factors in Efficiency Evaluation: Comment", *European Journal of Operational Research*, 157(1), pp. 242-245.

Färe, R., S. Grosskopf, and B. Lindgren, et al. (1994), *Productivity Developments in Swedish Hospitals: A Malmquist Output Index Approach*, Kluwer Academic Publishers, Boston, pp. 253-272.

Färe, R., S. Grosskopf, and C. A. K. Lovell, et al. (1989), "Multilateral Productivity Comparisons When Some Outputs are Undesirable: A nonparametric Approach", *The Review of Economics and Statistics*, 71(1), pp. 90-98.

Färe, R., S. Grosskopf, and D. Noh, et al. (2005), "Characteristics of a Polluting Technology: Theory and Practice", *Journal of Econometrics*, 126(2), pp. 469-492.

Hailu, A. and T. S. Terrence (2001), "Non-Parametric Productivity Analysis with Undesirable Outputs: An Application to the Canadian Pulp and Paper Industry", *American Journal of Agricultural Economics*, 83(3), pp. 605-616.

Malmquist, S. (1953), "Index Numbers and Indifference Surfaces", *Trabajos de Estadística y de Investigación Operativa*, 4(2), pp. 209-242.

Picazo-Tadeo, A. J., E. Reig-Martínez, and F. Herna'ndez-Sancho (2005), "Directional Distance Functions and Environmental Regulation", *Resource and Energy Economics*, 27(2), pp. 131-142.

Scheel, H. (2001), "Undesirable Outputs in Efficiency Valuations", *European Journal of Operational Research*, 132(2), pp. 400-410.

Seiford, L. M. and J. Zhu (2002), "Modeling Undesirable Factors in Efficiency Evaluation", *European Journal of Operational Research*, 142(1), pp. 16-20.

Shephard, R. W. (1970), *Theory of Cost and Production Functions*, Princeton: Princeton University Press, pp. 56-59.

Tyteca, D. (1996), "On the Measurement of the Environmental Performance of Firms: A Literature Review and a Productive Efficiency Perspective", *Journal of Environmental Management*, 46(3), pp. 281-308.

Zaim, O. (2004), "Measuring Environmental Performance of State Manufacturing Through Changes in Pollution Intensities: A DEA framework", *Ecological Economics*, 48(1), pp. 37 – 47.

Zhou, P., B. W. Ang, and J. Y. Han (2010), "Total Factor Carbon Emission Performance: A Malmquist Index Analysis", *Energy Economics*, 32 (1), pp. 194 – 201.

Performance Difference of Heavy Metal Emissions from Industrial Wastewater among Provinces in China

ZHANG Jia-qi^{1,2,3}, MIAO Chang-hong¹

(1. Key Research Institute of Yellow River Civilization and Sustainable Development & Collaborative Innovation Center on Yellow River Civilization of Henan Province, Henan University, Kaifeng 475001, China;

2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on environmental DEA efficiency measurement approach, the authors built the Malmquist heavy metal emissions performance index (MHPI) which pays attention on the undesired output, and calculated the heavy metal emissions performance of industrial wastewater in 29 provinces of China from 2003 to 2011. Results show that most of China's provincial MHPIs enhanced unceasingly, and were mainly driven by technological progress, while the technical efficiency which reflects the catch-up effect was not prominent enough. The MHPIs of Guizhou, Qinghai, Jiangsu and Ningxia tended to decline averagely. The MHPIs of four major economic regions in China were all improved to some extent, the central region had the highest cumulative improvement, the east and the west region came next, and the northeast region was the lowest, but the change of regional MHPI showed the convergent tendency. The traditional DEA model which failed to consider the undesired output overestimated the provincial Malmquist industrial production performance index (MIPI). Combined the MHPI and MIPI into 9 types according to high, medium and low levels respectively, we found that most of provinces in China belonged to medium-medium type. The Inner Mongolia, Liaoning, Gansu, Hubei, Hunan, Sichuan and Xinjiang presented high-high type, and Hebei and Henan rendered in high-medium type, while Jiangsu, as the most economically developed province in eastern China, presented a low-low type, but Qinghai and Ningxia whose economy are relatively backward in western region presented low-high type, and Guizhou rendered in low-medium type.

Key Words: heavy metal from industrial wastewater; malmquist heavy metal emission performance index; industrial production performance index; environmental DEA