

湖南工业生态效率评价及影响因素实证分析

——基于 DEA 方法^{*1}

杨亦民^{1, 2} 王梓龙^{*1}

(1. 湖南农业大学商学院, 中国湖南长沙 410128;

2. 中国社会科学院工业经济研究所, 中国北京 100836)

【摘要】: 以湖南工业产业为研究对象, 基于 DEA 评价视角, 全面评价湖南工业生态效率。选取科技投入、规模程度、环境监测、政府管制、经济发展速度、资本总额 6 项工业生产指标, 采用 DEA 评价法测算湖南省 14 个市州的工业生态效率, 对选取指标进行多元线性回归。回归结果显示: 规模程度、政府管制与湖南工业生态效率呈显著负相关性, 经济发展速度、资本总额与湖南工业生态效率呈显著正相关性。通过对影响因素的系统分析, 找到提高湖南工业生态效率的政策切入点: 限制湖南工业企业盲目扩张, 规范政府管制行为, 助力社会经济发展, 增加节能环保资金投入。

【关键词】: 绿色发展; 工业; 生态效率; 湖南省

【中图分类号】: F403.7 **【文献标志码】**: A **【文章编号】**: 1000 - 8462 (2017) 10 - 0151 - 06

DOI: 10.15957/j.cnki.jjdl.2017.10.019

自 1980 年代以来, 在国家和政府的大力支持以及国内学者的不断努力下, 对生态效率的理论研究、生态效率的评价方法研究和生态效率的提升应用研究从未停止过, 并取得了较大的成绩。中国共产党十六届五中全会明确提出了要建立资源节约型和环境友好型社会, 即“两型”社会, 在建设两型社会的背景下, 我国生态效率的研究不断向可持续发展领域融合和渗透, 对生态效率理论及评价方法的研究也逐步地向深度和广度扩展。

湖南省是中国中南部内陆省份, 近年来湖南响应中央的号召, 建设两型社会, 注重工业生态效率的评价和提升, 并取得了一些成效, 生态效率在全国处于中上水平。但是, 近年来一些地方盲目追求经济效益, 忽略了环境方面的因素, 再加上湖南本身资源较为匮乏, 产业结构也不是很合理、科技水平不高、环境政策执行不到位、治污力度不强等因素, 导致了湖南省工业方面资源消耗量较大、环境污染严重、能源利用率不高、污染排放物得不到很好的处理等, 湖南工业生态效率有待进一步提高。

¹ 收稿时间: 2017 - 01 - 19; 修回时间: 2017 - 04 - 24

基金项目: 湖南省情与决策咨询课题 (2014ZZ102)

作者简介: 杨亦民 (1973—), 男, 湖南隆回人, 教授, 博士生导师。主要研究方向为产业生态与管理。E-mail: yymjiao@163.com。

*通讯作者: 王梓龙 (1989—), 男, 湖南临澧人, 博士研究生。主要研究方向为产业生态与管理。E-mail: 839784717@qq.com。

1 文献回顾

1987 年,“可持续发展”概念首次由联合国环境与发展委员会(WCED)提出,于 1992 年被联合国环境与发展首脑会议所接受,并开始广泛应用于生态经济研究^[1]。通过测算经济生产活动中产品或服务的价值与资源环境的影响比值来衡量区域内生态效率的水平,从此生态效率的相关研究在全球快速发展起来,为解决资源和环境问题以及人与自然环境和谐等重大问题提供了大量的理论依据^[2]。

我国对生态效率的相关研究起源于产业,关于区域内生态效率的研究需要将区域内资源和环境因素综合起来进行分析,因此对于区域层面生态效率的相关研究仍是一个难题。目前评价区域内生态效率的方法主要有经济与环境比值评价法、因子分析法以及数据包络分析法。经济与环境比值评价法研究区域生态效率时无法有效分析资源与环境变量的多投入、多产出问题,同时指标选择和估计结果容易受主观因素影响^[3];而因子分析法则无法真实反映各变量因子对区域环境影响的重要程度;DEA 评价法摒弃传统主观赋权方法,采用统计学方法实现指标自动赋权,并使非期望产出变量得到有效处理,研究多投入、多产出问题,指出研究主体 DEA 估计无效原因以及改进方向和程度。近年来不断有学者运用 DEA 模型研究区域生态效率,并结合计量分析方法研究了影响区域内生态效率的具体因素。杨文举基于 DEA 视角研究中国省份工业的生态环境效率,并运用 Tobit 模型对我国多个省份的环境绩效影响因素进行实证分析,构建提升我国多个省份环境生态效率的路径^[4]。郭露等基于 2003—2013 年我国 6 省面板数据,运用 DEA 模型,在测算各区域 DEA 综合效率有效的前提下,建立超效率 DEA 模型,进一步研究各区域的工业生态效率,并结合经济计量模型,分析影响各区域工业生态效率的主要影响因素^[5]。

鉴于此,本文以区域层面为视角,从资源与环境投入、产出的角度出发,利用 DEA 模型对湖南省 2009—2014 年工业产业生态效率进行综合评价,找出影响湖南省工业生态效率的主要因素,构建回归模型,进行多元线性回归,对影响湖南工业生态效率的相关因素进行系统分析,为丰富和发展我国产业生态理论以及促进我国工业产业结构不断优化提供有益的参考借鉴。

2 湖南工业生态效率评价

2.1 DEA 模型构建

数据包络分析法(DEA),也称为 Farrell 型有效分析法或非参数分析法,是 1978 年美国著名运筹学家 Charnes 和 Cooper 提出一种评价决策单元相对效率的方法^[6]。其评价单元有效性思想源于生产产品输入与输出状态下的效率来定义,该效率为输出与输入的比值。在生产过程中,不仅用于单投入、单产出的情况,也作用于多投入、多产出的情形,其生产效率为产出项加权值与投入项加权值之比。传统的 DEA 模型只考虑经济指标,无法有效处理非期望投入与产出指标,新的 DEA 评价模型,包含了污染物指标与经济指标,能正确计算出决策系统的生态经济效率。其运行计算模型主要各类产出以“非对称”方式进行曲线测度,即要满足增加期望产出目标,同时严格控制非期望产出。对期望产出效率的分析主要通过曲线径向测度,对污染物等非期望产出效率测算,通过取其曲线测度倒数来衡量,从而科学决策如何增加期望产出,减少污染物排放,是一种评价区域内生态效率的有效方法。该方法事先确定模型和估计参数,有效地避免了人为确定权重产生的主观影响,因而在生态效率的研究中得到广泛应用。

目前最具代表性的 DEA 模型包括 CCR 模型和 BCC 模型,沿生产前沿面的曲线测度形态显示,CCR 的生产可能集是凸锥形,而 BCC 则是一个凸多面体形态,CCR 是线性的,BCC 相比于 CCR 去掉了线性假设,是分段线性的。CCR 测算 DEA 绝对有效点,为了能更直观地显示出生产规模收益的有效性,BCC 在生产前沿面一般分为三段,对比 CCR 的斜率来判断规模收益的增减,更加明确研究对象生产效率的改进方向。本文为了明确湖南工业生态效率规模收益的增减,确定生态效率改进方向,为下一阶段的影响因素三段实证对比分析打下基础,决定采用 BCC 模型中可变规模报酬(VRS)来测算湖南工业生态效率。

建立湖南工业生态效率测算的 DEA 模型,假设模型中有 K 个决策单元,每个决策单元 N 种投入 X 、 I 种非期望产出 U 以及

M 种期望产出 Y，则湖南工业生态效率的 DEA 评价模型可以表示为：

$$\begin{cases} \text{Min } \theta \\ \text{s.t. } \sum_{k=1}^K z_k x_{nk} \leq \theta x_{n0}, n=1,2,\dots,N; \\ \sum_{k=1}^K z_k y_{mk} \leq \theta y_{m0}, m=1,2,\dots,M; \\ \sum_{k=1}^K z_k u_{ik} \geq u_{i0}, i=1,2,\dots,I; \\ \sum_{k=1}^K z_k = 1; z_k \geq 0; \theta \leq 1 \end{cases}$$

式中：θ 为湖南工业生态效率值，其取值范围在 0~1 之间，当 θ 为 1 时表示湖南工业生态效率完全有效；x、y、u 分别表示决策单位的投入、期望产出和非期望产出值；z 表示 k =1、2…，k 的权重，当 z 等于 1 或非负模型表示可变规模报酬的 DEA 模型。

2.2 建立投入与产出指标体系

选取投入指标分为资源消耗和环境污染两部分。其中，资源消耗选取了工业能源消耗、工业水资源消耗、工业资本投入以及工业人力资本投入四个指标。工业能源消耗以各市州消耗多少万吨标准煤来表示，工业水资源消耗以各市州工业用水总量表示，工业资本投入以各市州规模以上工业企业资产总计（亿元）来表示，工业人力资本投入以各市州第二产业从业人员年末人数（万人）来表示。环境污染指标通常采用工业“三废”排放量来表示。工业废水排放以各市州工业废水排放量（万 t）来表示，工业废气排放以各市州工业 SO₂ 排放量（t）来表示，由于各市州工业固体废弃物排放量难以获取，因为工业一般固体废弃物综合利用与工业固体废弃物

排放量具有相关性，因此选取各市州工业一般固体废弃物综合利用率作为工业固体废弃物排放量的替代指标。

2.3 运算结果分析

通过对《湖南省统计年鉴》《中国城市统计年鉴》进行数据挖掘，整理出 2009—2014 年湖南省 14 个市工业生产的相关数据，选取全年地区 GDP 为产出指标，并以 2009 年 GDP 为基期作不变价处理，选取工业三废的排放量为负投入指标，工业能源消耗、水资源消耗、资本投入、人力资本投入为正投入指标。在上述数据的基础上采用可变规模报酬（VRS）进行分析计算，并运用 DEAP 软件进行具体的模型运算，计算结果见表 2。

表 1 生态效率投入产出指标体系

指标	二级指标	指标内容
投入指标	资源消耗	工业能源消耗 工业能源消费总量
	工业水	工业水资源消耗 工业水消费总量
	工业资本投入	工业企业资产总计

产出指标	环境污染	工业人力资本投入		工业从业人员年末人数	
		废水排放		工业废水排放量	
		废气排放	固体废弃物排放	工业 SO ₂ 排放量	固体废弃物综合利用率
		工业总产出		工业总产出值	

表 2 2009—2014 年湖南 14 市州工业生态综合效率（crste）运算结果

市州	2009	2010	2011	2012	2013	2014
长沙市	1	1	1	1	1	1
株洲市	0.5	0.544	0.544	0.882	0.95	0.873
湘潭市	0.396	0.404	0.462	0.703	0.797	0.775
衡阳市	0.373	0.364	0.49	1	1	1
邵阳市	0.366	0.57	0.533	0.473	0.505	0.458
岳阳市	0.347	0.302	0.271	0.531	0.58	0.552
常德市	0.528	0.471	0.447	0.818	0.901	0.772
张家界市	0.481	0.462	0.33	0.267	0.344	0.395
益阳市	0.214	0.176	0.161	0.616	0.736	0.732
湘州市	0.934	0.93	0.908	0.661	0.772	0.11
永州市	0.389	0.378	0.38	0.656	0.738	0.6
怀化市	0.641	1	0.808	0.632	0.7	0.623
娄底市	0.627	0.742	0.765	0.809	0.688	0.614
湘西州	1	0.637	0.708	0.429	0.502	0.451
平均值	0.557	0.57	0.557	0.677	0.729	0.64

DEA 模型计算综合效率值为纯技术效率与规模效率的乘积，运算结果显示湖南省 2009—2014 年工业生态综合效率平均值处于逐步增加的状态，其中长沙 2009—2014 年总效率为 1，生态效率有效，在全省处于较高的水平，株洲、湘潭、衡阳基本处于 0.8 以上，衡阳在 2012—2014 年综合效率接近 1，并处于上升态势。张家界、岳阳、益阳综合效率在 0.4 以下，张家界呈现下降趋势，郴州在 2014 年综合效率突然下降，且降幅较大，在全省处于较低水平。DEA 模型计算纯技术效率值为综合效率值与规模效率值之比，运算结果显示湖南省 2009—2014 年工业生态纯技术效率处于逐步递增的趋势，其中长沙、张家界、湘西、娄底、怀化 2009—2014 年工业纯技术效率接近 1，技术效率有效，湘潭、株洲、衡阳、常德、益阳、永州基本处于 0.8 以上。岳阳、邵阳纯技术效率在 0.6 左右，并呈现下降趋势，郴州在 2014 年工业纯技术效率陡降，在全省处于较低水平。

表 3 2009-2014 湖南 14 市州工业生态纯技术效率 (vrste) 运算结果

市州	2009	2010	2011	2012	2013	2014
长沙市	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
株洲市	0.518	0.558	0.564	0.964	0.992	0.928
湘潭市	0.413	0.421	0.499	0.803	0.849	0.852
衡阳市	0.375	0.387	0.514	1.000	1.000	1.000
邵阳市	0.551	0.653	0.736	0.685	0.624	0.601
岳阳市	0.348	0.356	0.306	0.583	0.611	0.594
常德市	0.570	0.493	0.498	0.928	0.969	0.860
张家界市	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
益阳市	0.214	0.203	0.237	0.796	0.860	0.856
郴州市	1.000	0.941	0.980	0.751	0.831	0.301
永州市	0.462	0.530	0.545	0.927	0.904	0.778
怀化市	0.672	1.000	1.000	0.865	0.871	0.798
娄底市	0.670	0.754	1.000	1.000	0.753	0.671
湘西州	1.000	0.838	1.000	0.962	1.000	1.000
平均值	0.628	0.653	0.706	0.876	0.876	0.803

DEA 模型计算规模效率值为综合效率值与纯技术效率值之比,可以得出规模效率,规模效率越接近于 1,表示规模大小越合适。若规模效率等于 1,则该决策单位处于固定规模报酬阶段,若规模效率低于 1,则表示该决策单位处于规模报酬递增或递减的低效率状态。湖南大部分市州工业生态规模效率处于 0.8 以上,其中长沙、衡阳、怀化、益阳规模效率为 1,规模效率有效,邵阳、张家界规模效率接近 0.5,郴州在 2014 年工业规模效率陡降,处于较低状态,长株潭地区于 2011 年处于规模报酬递减的阶段,其工业产出的增加小于投入的增加,出现了资源投入冗余,应限制能源过度消耗以及减少工业三废的排放,以提高区域内工业生态效率;其余区域均处于规模报酬递增阶段,说明其工业产出的增加幅度略大于投入的增加幅度,因此应适当地扩大生产规模,同时应加强生产过程中的能源消耗、水资源消耗、资本投入、人力资本投入,从而全面提高湖南省工业生态效率水平。

表 4 2009-2014 年湖南 14 市州工业生态规模效率 (scale) 运算结果

市州	2009		2010		2011		2012		2013		2014	
长沙市	1.000	—	1.000	—	1.000	—	1.000	—	1.000	—	1.000	—
株洲市	0.966	drs	0.976	irs	0.964	irs	0.915	irs	0.958	irs	0.940	irs
湘潭市	0.961	drs	0.959	irs	0.925	irs	0.876	irs	0.938	irs	0.910	irs
衡阳市	0.996	irs	0.941	irs	0.954	irs	1.000	—	1.000	—	1.000	—
邵阳市	0.665	irs	0.873	irs	0.724	irs	0.690	irs	0.809	irs	0.762	irs

岳阳市	0.998	drs	0.850	irs	0.886	irs	0.910	irs	0.949	irs	0.929	irs
常德市	0.927	drs	0.956	irs	0.897	irs	0.882	irs	0.930	irs	0.898	irs
张家界市	0.481	irs	0.462	irs	0.330	irs	0.267	irs	0.344	irs	0.395	irs
益阳市	0.999	-	0.869	irs	0.682	irs	0.773	irs	0.855	irs	0.855	irs
郴州市	0.934	drs	0.988	irs	0.926	irs	0.880	irs	0.929	irs	0.366	irs
永州市	0.841	irs	0.713	irs	0.697	irs	0.708	irs	0.817	irs	0.771	irs
怀化市	0.954	drs	1.000	-	0.808	irs	0.730	irs	0.804	irs	0.781	irs
娄底市	0.936	drs	0.983	drs	0.765	irs	0.809	irs	0.914	irs	0.916	irs
湘西州	1.000	-	0.760	irs	0.708	irs	0.446	irs	0.502	irs	0.451	irs
平均值	0.904		0.881		0.805		0.778		0.839		0.784	

注：irs 表示规模效率递增；drs 表示规模效率递减；-表示规模效率有效。

3 湖南工业生态效率差异的影响因素分析

3.1 提出假设

在国内学者李海东、陈傲等研究^[7-8]的基础上，本文选取科技投入、规模程度、环境监测、政府管制、经济发展速度、资本总额 6 个指标，作为影响湖南工业生态效率的因素。

H1：科技投入越大，工业生态效率越高。

科学技术是第一生产力，科学的不断发展使人类对自然的认识达到了一个新的高度，并不断丰富人类的物质生活，改变了人类原有的生产和生活方式。因此为了实现科学技术与工业生态效率和谐发展，互利共赢，有必要在工业领域实现生态科学技术创新。

H2：规模程度越大，工业生态效率越高。

工业企业规模程度扩大，将会产生规模效益，为工业企业带来更多的经济收益。但工业生态效率不仅取决于工业企业经济收益，同时也取决于资源、能源消耗和污染物排放，因此，工业企业在扩大规模的同时，要注意控制因规模扩大可能带来的资源、能源过度消耗，以及排污量增加等问题。

H3：环境监测力度越大，工业生态效率越高。

如果一个行业没有环境保护的监督，那么它很可能会忽视自身对资源及外部环境的影响，这将会促使其毫无顾虑地浪费资源、污染环境。促进工业环境监督管理的顺利进行，可能对提高工业生态效率具有较大的作用。

H4：政府管制力度越大，工业生态效率越高。

工业企业从事生产制造盲目追求经济利益，缺乏自觉性，因此为了更好地提升制造业生态效率，有必要听从政府部门的引导和加强环境保护法律建设，使保护环境的相关责任在工业企业得以有效落实，并赋予其规范性、权威性，将会保障工业生态效率稳步提升。

H5: 经济发展速度越快, 工业生态效率越高。

由于生态效率可表示为区域内产品和服务的增量与环境影响的比值, 区域内经济发展速度越快, 将会给区域社会带来更多的产品和服务, 基于此, 经济社会的发展将会带动区域内工业生态效率的提高。但应注意盲目追求社会经济快速发展, 会产生浪费资源、污染环境等问题。因此, 有必要注意兼顾环境保护 [9]。

H6: 资本投入越多, 工业生态效率越高。

工业科学技术创新需要资金进行新技术、新设备的购入和自主研发, 产业结构方面需要资金进行产业技术引入和资源分配优化方面的调整, 环境保护监督监测机制的稳定运行需要资金的支持, 政府引导和法律建设也需要资金保障。因此, 加大资金投入将可能使工业生态效率得到提升 [10]。

3.2 建立回归模型

根据选取的科技投入、规模程度、环境监测、政府管制、经济发展速度、资本总额 6 个指标, 构建如下模型:

$$E = \beta_0 + \beta_1 TECH + \beta_2 SIZE + \beta_3 MONITOR + \beta_4 MANAGE + \beta_5 ECONOMY + \beta_6 MONEY + \varepsilon$$

式中: E 为因变量; β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 、 β_5 、 β_6 为待估参数; β_0 为截距项; ε 是随机干扰项。E 是被解释变量, 用上文两类评价法测算出来的湖南工业生态效率评价价值来衡量; TECH 代表科技投入, 用当年科技活动经费支出总额衡量; SIZE 是规模程度, 用规模以上工业企业工业总产值衡量; MONITOR 代表环境监测, 用环境管理人力投入衡量; MANAGE 代表政府管制, 为了便于量化, 用要求工业企业年污水处理量表示; ECONOMY 代表经济发展速度, 用区域内全社会生产总值衡量; MONEY 代表资本总额, 用工业企业投入固定资产总计衡量。

表 6 基于 DEA 评价法湖南工业生态效率影响因素回归结果

亦昼	模型		
	(1)	(2)	(3)
tech	-0.084(-0.336)	-0.073(-0.258)	0.058(0.282)
size	-0.928**(-1.860)	-1.691***(-2.973)	0.586(1.415)
monitor	-0.028(-0.152)	-0.315(-1.510)	0.242(1.592)
manage	-0.25***(-2.550)	-0.249***(-2.197)	-0.011(-0.136)
economy	1.015**(2.392)	1.479*** (3.056)	-0.363(-1.029)
money	0.159**(1.452)	0.092(0.743)	0.065(0.720)
常数项	4.823(6.975)	8.009(10.161)	6.601(11.507)
R ²	0.352	0.170	0.251
sample	84	84	84

3.3 变量定义与描述性统计

普遍认为科技投入、规模程度、环境监测、政府管制、经济发展速度、资本总额等方面都存在差异，因此其对湖南工业生态效率的作用也应该存在差异性影响，为了更好地对各指标进行多元线性回归，在运算之前对选取数据进行了标准化处理，主要包括对回归自变量数量单位进行相关调整，由于 2013、2014 年湖南省各市州科技活动经费支出总额数据缺失，本文用 2013、2014 年湖南省各市州规模以上工业企业 R&D 经费内部支出总额数据进行替代^[11]。

表 5 基于 DEA 评价法测算生态效率的变量定义与描述性指标值

变量	变量符号	变量定义	观测值	均值	标准差
综合效率	e_d	DEA 测算工业综合生态效率评价价值	84	6.22	2.40
纯技术效率	r_t	DEA 测算工业纯技术生态效率评价价值	84	7.57	2.41
规模效率	e_s	DEA 测算工业规模生态效率评价价值	84	8.32	1.85
科技投入	tech	当年科技活动经费支出总额	84	1.89	2.60
规模程度	size	规模以上工业企业工业总产值	84	1.90	1.77
环境监测	monitor	环境监测人力投入	84	4.74	1.90
政府管制	manage	要求工业企业年污水处理量	84	7.69	8.75
经济发展速度	economy	区域内全社会生产总值	84	3.57	3.38
资本总额	money	工业企业投入固定资产总计	84	11.19	11.19

3.4 基于 DEA 测算结果的湖南工业生态效率回归分析

根据上文建立的多元线性回归模型，以选取的湖南 14 个市州 2009—2014 年科技投入、规模程度、环境监测、政府管制、经济发展速度、资本总额指标作为多元回归模型的自变量，以湖南 14 个市州 2009—2014 年工业生态综合效率、纯技术效率、规模效率 DEA 评价价值作为多元回归模型的应变量，导入 SPSS19 计量软件，得出回归测算结果显示：模型（1）、（2）、（3）分别是基于 DEA 测算的综合效率、纯技术效率、规模效率为应变量的回归计量模型，反映出各影响因素对三类 DEA 测算效率不同的影响结果， R^2 是模型测算的拟合度，三类 DEA 模型 R^2 分别为 0.352、0.170、0.251，回归测算样本总量为 84 个，数据为时序性面板数据，由于数据为宏观小样本面板数据，因此回归拟合度在微观层面是合理的^[12]。基于各影响因素回归测算的 sig 值以及非标准化系数，反映出各影响因素的显著性以及影响的正负方法，具体情况如下。

在模型（1）中规模程度、政府管制、经济发展速度与资本总额的 sig 值（P 值）小于 0.05，表明其对湖南工业综合生态效率具有显著影响。科技投入、环境监测的 sig 值大于 0.05，表明其对湖南工业综合生态效率影响不显著。其中规模程度、政府管制与湖南工业生态效率呈负相关性，这一结果充分说明：近年来湖南盲目扩大工业生产规模，严重阻碍了工业生态效率的提升；此外政府的相关管制处罚措施对湖南工业综合生态效率的提升没有起到相应的作用，无法有效改善工业生态效率。资本总额、经济发展速度与湖南综合工业生态效率呈正相关性，这一结果充分说明：湖南作为承接工业产业转移的重要省份，正处于工业起步和快速发展阶段，工业化水平并不高，社会经济发展成为带动工业生态效率发展的重要力量^[13]；工业资金的投入对湖南工业综合生态效率的提高起到了积极的作用。

在模型（2）中规模程度、政府管制、经济发展速度的 sig. 值（P 值）小于 0.05，因此，表明其对湖南工业纯技术生态效率具有显著影响。科技投入、环境监测以及资本总额的 sig. 值大于 0.05，表明其对湖南工业纯技术生态效率影响不显著。其中规模程度与政府管制与湖南工业生态效率呈负相关性，这一结果说明：工业规模无限扩大，极大限制了湖南工业生态效率，阻碍湖南工业良性发展；此外政府的相关管制处罚措施对湖南工业纯技术生态效率的提升没有作用。另外资本总额、经济发展速度与湖南工业纯技术生态效率呈正相关性，这一结果说明：湖南社会经济发展正成为带动工业生态效率发展的重要力量。

在模型（3）中没有指标对湖南工业生态效率具有显著意义，各指标对 DEA 测算出来的湖南工业规模生态效率无显著影响。这一结果说明工业纯技术效率对工业综合生态效率支持作用相比于规模效率更为明显。

4 结论及政策建议

①科技投入对湖南工业生态效率影响不显著，且呈负相关。湖南省正处于工业化发展的起步阶段，目前对工业科技投入更多地是造成资源、能源浪费，并没有有效减少工业三废的排放，因此，应减少不必要的科技投入，更加有效地利用科技投入，提高资源、能源利用效率，减少工业污染物排放，促进湖南工业生态效率的提升。

②规模程度对湖南工业生态效率影响显著，呈负相关性。目前，湖南工业发展处于粗放扩张阶段，工业企业规模的盲目扩大，导致资源、能源利用效率低下，工业规模扩大在促进湖南 GDP 增长的同时，对地区环境带来严重的污染，治理成本大于 GDP 增长带来的福利，因此有必要限制湖南工业企业盲目扩张。

③环境监测对湖南工业生态效率影响显著，呈负相关性。目前，湖南对工业生产的环境监测不规范，并没有起到监督警示作用，相反造成人力资源、财力的浪费，反映出湖南工业发展片面追求经济效应，忽略环境监控，因此需规范湖南省环境保护监督。

④政府管制对湖南工业生态效率影响显著，呈负相关性。湖南工业企业在保护环境、节约资源上一直处于模糊不清的状态，缺乏自律性。政府部门采取的措施对工业企业没有起到相应的引导作用，无法有效规范工业企业高效率清洁生产。因此，应规范政府管制，给予工业企业正确的引导。

⑤经济发展速度对湖南工业生态效率影响显著，呈正相关性。在湖南省工业起步和发展前期，社会经济发展对工业生态效率仍具有促进作用，社会经济的高速发展为工业生产提供了更多的资源，工业生态效率的提升关键在于资源的有效利用和减少污染物排放，因此更多的资源投入将带来更多的工业产出，有助于提升工业生态效率水平，在现阶段应积极促进社会经济发展。

⑥资本投入对湖南工业生态效率影响显著，呈正相关性。资金投入使保障湖南工业生态效率发展的坚实基础，是影响工业实现长远发展和实现人与环境和谐共存的有力保障。应加大工业资本投入，促进工业生态效率提高。

参考文献：

[1] Aanand Davé, Konstantinos Salonitis, Peter Ball, et al. Factory Eco-Efficiency Modelling: Framework Application and Analysis [J]. Procedia Cirp, 2016, 40: 214 – 219.

[2] Passeti E, Tenucci A. Eco-efficiency measurement and the influence of organisational factors: evidence from large Italian companies [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 122: 228 –239.

[3] Coronado C R, Villela A D C, Silveira J L. Ecological efficiency in CHP: Biodiesel case [J]. Applied

Thermal Engineering, 2010, 30(5): 458 - 463.

[4] 杨文举. 中国省份工业的环境绩效影响因素——基于跨期 DEA-Tobit 模型的经验分析 [J]. 北京理工大学学报: 社会科学版, 2015(2): 40 - 48.

[5] 郭露, 徐诗倩. 基于超效率 DEA 的工业生态效率——以中部六省 2003—2013 年数据为例 [J]. 经济地理, 2016, 36(6): 116 - 121, 58.

[6] Charnes A, Cooper Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units [J]. European Journal of Operational Research, 1978(2): 429 - 444.

[7] 李海东, 王善勇. “两型”社会建设中生态效率评价及影响因素实证分析——以 2006~2009 年省级面板数据为例 [J]. 电子科技大学学报: 社科版, 2012(6): 72 - 77.

[8] 陈傲. 中国区域生态效率评价及影响因素实证分析——以 2000—2006 年省际数据为例 [J]. 中国管理科学, 2008(S1): 566 - 570.

[9] 程晓娟, 韩庆兰, 全春光. 基于 PCA-DEA 组合模型的中国煤炭产业生态效率研究 [J]. 资源科学, 2013(6): 1 292 - 1 299.

[10] 杨斌. 2000—2006 年中国区域生态效率研究——基于 DEA 方法的实证分析 [J]. 经济地理, 2009, 29(7): 1 197 - 1 202.

[11] 杨亦民, 王梓龙. 农林生态效率影响因素分析——以湖南省为例 [J]. 中南林业科技大学学报, 2015(12): 127 - 132.

[12] 宫大鹏, 赵涛, 慈兆程, 等. 基于超效率 SBM 的中国省际工业化石能源效率评价及影响因素分析 [J]. 环境科学学报, 2015(2): 585 - 595.

[13] 付丽娜, 陈晓红, 冷智花. 基于超效率 DEA 模型的城市群生态效率研究——以长株潭“3+5”城市群为例 [J]. 中国人口·资源与环境, 2013(4): 169 - 175.