

DOI: 10.5846/stxb201605261015

任胜钢, 张如波, 袁宝龙. 长江经济带工业生态效率评价及区域差异研究. 生态学报, 2018, 38(15): - .

Ren S G, Zhang R B, Yuan B L. Industrial Eco-efficiency Evaluation and Regional Differences of Yangtze River Economic Belt. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15): - .

长江经济带工业生态效率评价及区域差异研究

任胜钢¹, 张如波¹, 袁宝龙²

1 中南大学商学院, 长沙 410083

2 中南林业科技大学商学院, 长沙 410004

摘要: 提高长江经济带工业生态效率, 是促进工业向绿色转型升级的重要路径, 更是促进区域经济与生态协调发展的重要选择。本文将工业生态系统分解为工业经济、环境、能源三个子系统, 以 2009—2013 年 9 省 2 市的工业数据为基础, 采用网络 DEA 模型对长江经济带 9 省 2 市的工业生态效率及三个子系统效率进行评价。结果显示: (1) 长江经济带工业生态效率水平整体呈上升趋势, 且自上游至下游效率水平依次递增。(2) 长江经济带工业经济子系统效率水平相对稳定, 区域内以下游最高、上游最低; 环境子系统效率水平呈增长趋势, 区域内以下游最高、中游最低; 能源子系统效率水平呈增长趋势, 区域内以下游最高、上游最低; (3) 收敛性检验显示, 长江经济带工业生态效率及各子系统效率呈收敛趋势, 其中工业经济子系统效率呈相对稳定的状态。最后, 本文为长江经济带工业生态效率的改善提出可操作性的政策建议。

关键词: 工业生态效率; 工业生态系统网络结构; 网络 DEA; 长江经济带

Industrial Eco-efficiency Evaluation and Regional Differences of Yangtze River Economic Belt

REN Shenggang¹, ZHANG Rubo¹, YUAN Baolong²

1 Business School of Central South University, Changsha 410083, China

2 Business School of Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

Abstract: Improving the industrial eco-efficiency of Yangtze River economic belt is an important road to promote industrial transformation, upgrading and green development; additionally, it is indispensable to push forward the coordinated development of regional economy and ecology. We divided industrial ecosystem into three subsystems that is economy, environment and energy. Then, based on industrial data of 9 provinces and 2 municipalities in 2009—2013, we adopt network DEA model to evaluate the industrial eco-efficiency and its corresponding subsystems. Results show that: (1) Industrial eco-efficiency in the Yangtze River economic belt is on the rise and also it is increasing from upstream to downstream. (2) For the economic subsystem, its industrial eco-efficiency is relatively stable and it is highest in the downstream area, lowest in the upstream area. Regarding the environmental subsystem, its industrial eco-efficiency continues to grow and it is highest in the downstream area, lowest in the midstream area. With respect to the energy subsystem, its industrial eco-efficiency is also increasing and it is highest in the downstream area, lowest in the upstream area. (3) The convergence test shows the industrial eco-efficiencies of provincial ecosystem and its subsystems have a convergent tendency where the economic subsystem is in the relatively stable condition. Lastly, we provide practical insights into policies for improving the industrial eco-efficiency of Yangtze River economic belt.

基金项目: 国家社会科学基金重大项目 (15ZDA020); 国家自然科学基金青年项目 (71703171); 湖南省自然科学基金杰出青年项目 (2015JJ1018); 教育部哲社重大课题攻关项目 (16JZD013); 湖南省社会科学成果评审委员会课题 (XSP17YBZZ144)

收稿日期: 2016-05-26; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: csuft_ybl@163.com

Key Words: Industrial eco-efficiency; Industrial ecosystem network; Network DEA; Yangtze River economic belt

2014年,国务院发布《关于依托黄金水道推动长江经济带发展的指导意见》,推动长江经济带发展正式上升为国家重要战略。长江经济带覆盖上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南、贵州等11省市,面积约205万平方公里,人口和生产总值均超过全国的40%。同样长江经济带产业发展也面临严峻的资源、环境压力,2013年长江经济带工业废水排放总量达301.3亿吨,工业废气排放总量达1696.98万吨,2012年长江经济带能源消费总量达161463万吨标准煤,占全国36.4%^①。因此,构建一个综合评价产业经济绩效、能耗绩效、环境绩效的指标,以反映长江经济带工业绿色发展水平,是长江经济带产业绿色发展亟需解决的首要问题。

习近平总书记指出,在今后相当长一个时期,要把修复长江生态环境摆在压倒性位置,共抓大保护、不搞大开发^[1]。随着长江经济带工业经济发展,其资源、环境约束瓶颈日益突出。长江经济带布局40多万家化工企业,占全国化工总产量46%,干线港口危险化学品年吞吐量超过2亿吨;形成以长寿、涪陵、万州为中心的国家级天然化工基地,以泸天化、川天化和北方化为依托的化工园区,另外沿江“石化走廊”逐渐形成。长江经济带的工业结构性污染加剧了水质严重恶化,重庆、岳阳、武汉、南京、镇江、上海6市累计形成了600km的岸边污染带,约占长江干流污染带总长的73%,2013年340个评价水源地中全年水质合格的仅占57.6%^[2]。因此,生态环境保护成为长江经济带建设的重中之重。那么如何实现长江经济带产业发展和环境保护协调发展,成为亟需解决的关键问题。生态效率既考虑经济效益又要考虑环境效益,其核心是少投入、多产出、少污染,在对生态环境不构成威胁的前提下发展经济,实现经济、环境、资源协调发展^[3,4]。因而,提高长江经济带工业生态效率成为其产业绿色发展的重要着力点。因此,科学测度长江经济带工业生态效率水平,探究影响工业生态效率水平的因素,分析区域内效率水平的差异,将为长江经济带产业开发和制定合理的环境保护政策提供重要依据。

长江经济带工业生态效率评价,是通过评价工业经济发展、能源消耗与环境影响之间的综合效应,来研究工业生态系统物质交换与能量转换的关系,从而为推动工业生态系统的可持续发展提供决策支持。当前主要采用数据包络分析(DEA)或超效率DEA模型,以投入-产出的角度对区域及产业生态效率进行研究。例如, Arcelus (2005)^[5], Zhou (2008)^[6], Rashidi (2015)^[7]等学者使用DEA模型评价OECD国家的环境绩效或生态效率。成金华(2014)^[8]采用超效率DEA模型,从能源、环境角度选取投入指标,以经济增长为产出指标,得出中国生态效率呈波动性变化趋势及区域间存在递减趋势。潘兴侠(2013)^[9]采用灰色关联度分析法,从资源(劳动效率、能源效率等)、环境角度选取指标,评价我国省域生态效率水平。然而目前对生态效率的研究,主要从区域、产业的投入-产出关系进行分析,其评价结果难以考察经济类、能源类、环境类等要素分别对区域、产业生态效率的影响。因此,本文将长江经济带工业生态系统分解为经济、能源和环境三个子系统,采用网络DEA模型分别探讨各子系统的效率水平及区域工业生态效率的差异。这一研究对长江经济带工业发展模式转型具有重要理论和实践价值。

1 理论基础

1.1 能源-经济-环境(3E)系统

1972年“罗马俱乐部”提出增长极限理论后,能源、经济、环境三个问题越来越受关注,尤其20世纪80年代可持续发展观的完善,将能源、环境、经济纳入一个整体去研究成为必然。同时,国际能源研究所和环保机构联手构建了“能源-经济-环境”(3E)系统框架,研究三者之间发展规律与内在联系^[10]。目前对3E系统研

① 数据来源:根据长江经济带11省(市)统计年鉴进行整理。

态效率的定义,在原有的物质消耗、能源消耗及 CO₂排放量三个指标基础上引入经济指标,对韩国蔚山生态工业园生态效率进行评价,得出工业共生网络效率水平提高了 28.7%;在行业层面,Long (2015)^[23]采用 DSBM 模型分别对中国水泥制造业全要素生产效率和生态效率进行测算。Dorota (2016)^[24]采用生命周期评估 (LCA) 和生命周期成本 (LCC) 方法,评价了煤电工业生态效率。Wang (2016)^[25]基于物质流分析 (MFA) 分析法对中国水泥和水泥原料工业进行研究,得出水泥行业空气污染物、二氧化碳排放量及能源利用效率及成本。

目前对长江经济带工业生态效率的研究,Zhang (2014)^[26]通过经济增长与能源环境的协同效应来评价长江经济带生态服务价值,得出长江经济带经济协同发展,主要依靠能源及环境低成本。吴传清 (2014)^[27]通过对长江经济带工业全要素生产率 (TFP) 的分析,得出科技、教育等对工业 TFP 起促进作用,同时得出环境制约工业 TFP 效率水平。之后,吴传清 (2015)^[28]基于环境的角度对长江经济带能源要素效率进行分析,得出在环境约束下长江经济带能源效率下降的幅度较大。汪克亮 (2015)^[29]基于环境角度,对长江经济带工业生态效率 (IEE) 进行研究,得出长江经济带的 IEE 整体水平不高,资源节约与污染减排空间较大。任毅 (2016)^[30]基于三阶段 DEA 模型,对长江经济带工业能源效率空间差异进行研究,得出工业能源效率提升的瓶颈在于规模效率。

综上所述,本文将从以下几方面研究长江经济带工业生态效率:其一,将工业生态效率分为工业经济、能源、环境三个子系统,既能有效分析各子系统内部的投入-产出效率,也有助于全面分析长江经济带工业发展与能源消耗和环境影响之间的关系;其二,基于工业生态系统的“3E”理论,引入网络 DEA 模型。相对传统 DEA 模型 (诸如 C₂R^[31], BCC^[32] 及不确定 DEA^[33] 模型等),网络 DEA 不仅有助于将影响工业生态效率的投入-产出之间的关系有效识别,为工业生态效率的改进提供更精准的着力点,同时更能兼顾系统内部的关联性;其三,本文将长江经济带划分为上、中、下游三大区域分别对其进行评价,有助于为不同区域改进工业生态效率提供针对性的政策建议。

2 模型构建及指标体系设计

2.1 模型构建

本文对工业生态效率系统研究,立足“3E”理论,来打开长江经济带工业生态系统“黑箱”。结合曾嵘 (2000)^[14] 等学者的研究,本文对能源子系统主要从能源工业建设、能源存量增加、能源利用及能源成本来界定;对经济子系统主要从生产要素投入、要素利用效率及再利用效率及工业经济的合意产出和非合意产出来界定;对环境子系统主要从环境治理投入、废物排入及环境治理效果来界定。

能源子系统对经济子系统的投入 (能源存量) 成为经济发展的主要动力,环境子系统的废物排入成为能源子系统的成本;经济子系统的合意产出成为环境子系统中能源开采的支撑,非合意产出成为环境的废物排入;环境子系统的能源再利用会回流到经济子系统和能源子系统。即能源子系统为工业经济子系统提供生产要素,支撑工业经济发展,工业经济发展也推动能源需求增加;工业经济发展推动经济增长的同时带来环境问题,环境的治理也为工业经济发展创造良好的环境及资源的再次利用;能源消耗过程会给环境带来负影响,环境治理也使得废弃物再次利用成为资源。因此,整体的工业生态系统是由工业经济系统、能源系统及环境系统三个子系统耦合形成,且三个子系统之间相互关联,存在很强的相互依赖关系,如图 2 所示。

参考杨印生 (2013)^[34] 做法,本文将工业经济、环境、能源三个子系统,分别用 S_1, S_2, S_3 表示。如图 3 所示,三个子系统不仅有自己的外部投入 (投入 1、2、3) 和产出 (产出 1、2、3);同时系统内部之间存在输入与输出,用 $Link_{ij} (i \neq j; i, j = 1, 2, 3)$ 表示,此含义表示 S_i 对 S_j 输入,比如 $Link_{12}$ 表示工业经济子系统对环境子系统的输入。

工业生态系统中的 n 决策单元,其每个决策单元的三个子系统用 $S_p (p = 1, 2, 3)$ 表示,且 k 决策单元的 $S_p (p = 1, 2, 3)$ 子系统的外部输入为 x_k^p , k 决策单元的 $S_p (p = 1, 2, 3)$ 子系统的外部输出为 y_k^p ; k 决策单元的系统中, S_i 对 S_j 的输入为 $g_k^{(i,j)}$, S_j 对 S_i 的输出为 $h_k^{(j,i)}$ 。且 $i, j \in p$, 当 $i = j$ 时 $g_k^{(i,j)} = 0, h_k^{(j,i)} = 0$ 由此,我们

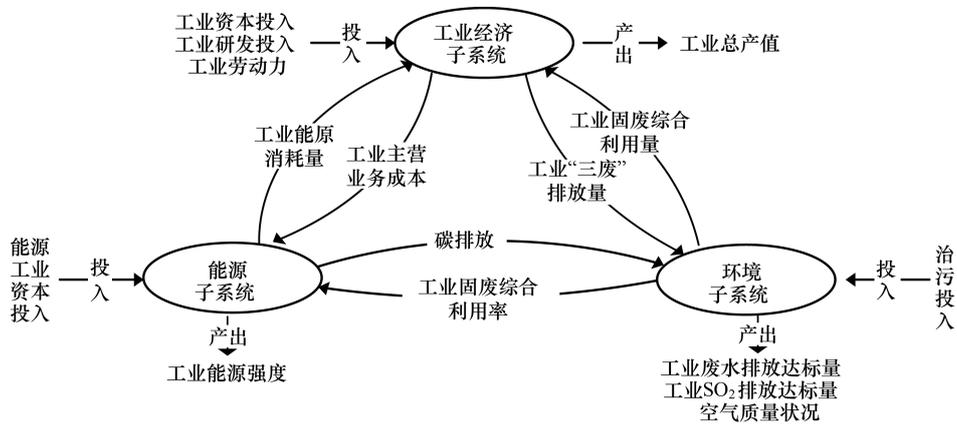


图2 长江经济带工业生态系统效率测算的网络结构

Fig.2 The Industrial ecological system efficiency measurement network structure of Yangtze River economic belt

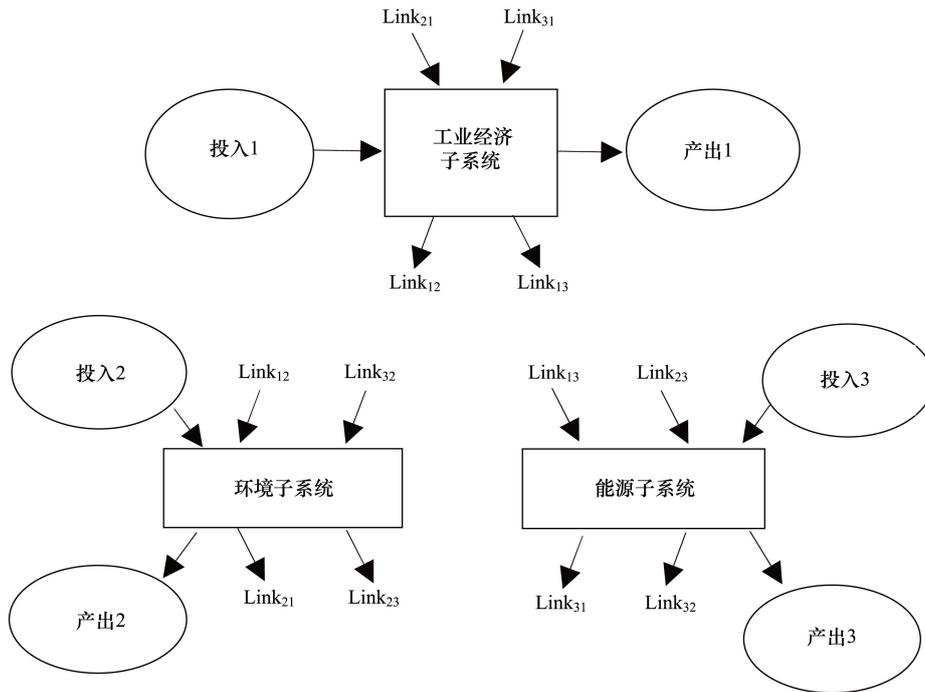


图3 长江经济带工业经济生态效率测算网络分解

Fig.3 The industrial economic and ecological efficiency calculations network decomposition of Yangtze River economic belt

可以得出决策单位 $DMU_k (k = 1, 2, \dots, n)$ 的任意子系统 $S_p (p = 1, 2, 3)$ 的所有投入与产出可以表示为 $(x_k^p, \sum_n g_k^{(i,j)}, y_k^p, \sum_n h_k^{(j,i)})$ 。其中 $x_k^p \in R^{m_p}$ ，而 m_p 是系统 S_p 的 m 个投入要素， $y_k^p \in R^{l_p}$ ，而 l_p 是系统 S_p 的 l 个产出要素，且 $x_k^p, g_k^{(i,j)}, y_k^p, h_k^{(j,i)} \geq 0$ 。

考虑到系统内部输入输出的平衡性，有：

$$\sum_3 \sum_{j=1}^3 \omega_{ij} g_k^{(i,j)} = \sum_3 \sum_{i=1}^3 \psi_{ji} h_k^{(j,i)} \tag{1}$$

其中， ω_{ij} 表示 S_i 对 S_j 的输入权重， ψ_{ji} 表示 S_j 对 S_i 的输出权重。此时，依据杨印生(2013)^[34]的网络 DEA 模型，本文将每个决策单元 DUM_k 的子系统 S_p 效率测算模型为下：

$$\begin{aligned}
\min \theta_p &= \theta_p^1 - \theta_p^2 \\
s.t. \sum_{k=1}^n x_k^p \lambda_k^p &\leq \theta_p x_o^p \\
\sum_{k=1}^n y_k^p \lambda_k^p &\leq \theta_p y_o^p \\
\sum_{k=1}^n g_k^{(i,j)} \lambda_k^p &\leq \theta_p g_o^{(i,j)}, i, j = 1, 2, 3 \\
\sum_{k=1}^n h_k^{(j,i)} \lambda_k^p &\leq \theta_p h_o^{(j,i)}, i, j = 1, 2, 3 \\
\lambda_k^p &\geq 0, k = 1, 2, \dots, n
\end{aligned} \tag{2}$$

以上为评价长江经济带工业生态效率系统三个子系统效率的 CCR 模型,长江经济带工业系统效率是综合效率值^[35],利用杨印生在提出网络 DEA 模型时的方法,将各子系统外部投入占外部总投入的比值作为权重,求出综合系统的效率值。因此,本文子系统权重为: $\beta_p = \frac{x_k^p}{\sum_{p=1}^3 x_k^p}$ 且 $\sum_{p=1}^3 \beta_p = 1$,长江经济带工业生态效率评

价值模型可以表示为:

$$\begin{aligned}
\min \theta &= \sum_{p=1}^3 \beta_p \theta_p \\
s.t. \sum_{k=1}^n x_k^p \lambda_k^p &\leq \theta_p x_o^p \\
\sum_{k=1}^n y_k^p \lambda_k^p &\leq \theta_p y_o^p \\
\sum_{k=1}^n g_k^{(i,j)} \lambda_k^p &\leq \theta_p g_o^{(i,j)}, i, j = 1, 2, 3 \\
\sum_{k=1}^n h_k^{(j,i)} \lambda_k^p &\leq \theta_p h_o^{(j,i)}, i, j = 1, 2, 3 \\
\lambda_k^p &\geq 0, k = 1, 2, \dots, n
\end{aligned} \tag{3}$$

2.2 指标体系设计

借鉴苏静(2013)^[36]、高珊(2010)^[37]、陈黎明(2012)^[38]、刘衍君(2010)^[39]、孙晓梅(2010)^[40]及王锋(2016)^[41]等人的研究。构建如表 1 所示的长江经济带工业生态系统投入-产出指标体系。

借鉴苏静^[36]、高珊^[37]等学者研究,本文选取工业资本、工业劳动力、工业能源消耗量等指标,作为衡量工业经济发展的主要动力;选取工业研发、固废综合利用量是考察工业绿色化、科技化水平;选取工业总产值、工业“三废”分别考察工业经济的合意及非合意产出,工业主营业务成本考察工业间接负效益即从工业子系统流入到能源子系统。重点考察经济子系统生产要素投入利用效率、合意产出水平等。

借鉴陈黎明^[38]、刘衍君^[39]等学者研究,本文选取治污投入、工业“三废”排放量、碳排放量作为投入指标,衡量环境的承载量;工业废水排放达标量、工业 SO₂ 排放达标量、空气质量指数(Air Quality Index,简称 AQI)、工业固废综合利用量及利用率作为产出指标,来反映环境治理能力及治理效果。重点考察环境子系统对经济子系统的非合意产出利用率、环境治理效果等。

本文选取固废综合利用量、工业固废利用率、碳排放量和工业 SO₂ 排放达标量四个指标,主要依据:陈黎明^[38]选取工业固废综合利用率及利用量作为环境子系统治理控制效果;借鉴孙晓梅^[40]选取固废综合利用率作为衡量能源再循环再利用率的指标,本文结合图 1 将固废综合利用率作为能源子系统的投入指标,并指出

环境子系统的产出指标工业固废综合利用率,会成为再利用能源流入经济子系统与能源子系统;同时,选取工业废气、废水达标量等指标,如工业 SO_2 达标量等作为环境污染控制效果。结合苏静^[36]等研究本文选取碳排放量作为能源子系统对环境子系统的投入,同时将工业 SO_2 排放达标量作为环境子系统治理效果。

表 1 工业生态系统投入产出指标

Table 1 Input-output index of the industrial eco-system

工业经济子系统投入产出指标	
投入指标(单位)	产出指标(单位)
工业资本投入(亿元)	工业总产值(亿元)
工业研发投入(亿元)	工业“三废”排放量(万吨)
工业劳动力(万人)	工业主营业务成本(亿元)
工业能源消耗量(万吨标准煤)	工业固废综合利用量(万吨)
工业固废综合利用量(万吨)	
环境子系统投入产出指标	
投入指标(单位)	产出指标(单位)
治污投入(万元)	工业废水排放达标量(万吨)
工业“三废”排放量(万吨)	工业 SO_2 排放达标量(万吨)
碳排放量(万吨)	空气质量指数
	工业固废综合利用率(%)
	工业固废综合利用量(万吨)
能源子系统产出投入指标	
投入指标(单位)	产出指标(单位)
能源工业资本投入(亿元)	工业能源消耗量(万吨标准煤)
工业主营业务成本(亿元)	碳排放量(万吨)
工业固废综合利用率(%)	工业能源强度(吨标准煤/万元)

借鉴苏静^[36]、陈黎明^[38]、王锋^[41]等学者指标选取方式,本文选取能源工业资本投入、工业主营业务成本、工业固废综合利用率作为投入指标,来衡量能源工业发展水平、能源再在利用水平及经济子系统对能源子系统依赖度;选取工业能源消耗量、碳排放量、工业能源强度作为产出指标,来反映能源产出规模及消耗效率及能源系统对环境子系统影响程度。主要考察能源子系统的投入水平、能源存量增长、能源利用效率及成本等。

3 数据来源及处理

本文以长江经济带作为研究对象,涵盖 9 省 2 市,具体为上游的四川、重庆、贵州、云南四省市,中游的湖北、湖南、江西三省及下游的上海、江苏、浙江、安徽四省。

工业生态系统效率评价选取 16 个指标,指标数据时间跨度为 5 年(2009—2013)。数据主要来源情况,工业资本投入(亿元)、工业能源消耗量(万吨标准煤)、工业固废综合利用量(万吨)、工业总产值(亿元)、工业主营业务成本(亿元)、工业固废综合利用率(%)来自《中国区域经济统计年鉴 2009—2013 年》;治污投入(万元)、工业废水排放达标量(万吨)、工业 SO_2 排放达标量(万吨)、工业“三废”排放量(万吨)来自《中国环境统计年鉴 2009—2013 年》;能源工业资本投入(亿元)来自《中国能源统计年鉴 2009—2013 年》,指的是分地区能源工业投资;工业能源强度(吨标准煤/万元)、碳排放量(万吨)计算指标数据来自《中国能源统计年鉴 2009—2013 年》;工业研发投入(亿元)来自《中国科技统计年鉴 2009—2013 年》;工业劳动力(万人)来自《中国统计年鉴 2009—2013 年》;空气质量状况来自 9 省 2 市的《统计年鉴 2009—2013 年》。为了消除通货膨胀的影响,我们使用现价/工业品出厂价格指数把货币值数据的当年价格转换成 2008 年不变价格。

同时,参照王恩旭(2011)^[42]利用熵值法将 9 省 2 市的工业固体废弃物排放量、工业 SO_2 排放量、工业废

水排放量三个指标综合成“工业三废排放量”指标。由于工业消耗的能源类型分别为原煤、原油、天然气、热力、电力等 18 种。但由于各种能源类型不一样,没有办法计算,为了便于计算统一标准,我们根据中国能源折算指数,把长江经济带 2009—2013 年的能源消耗量数据,按照折算指数折算成标准煤量数据。在将各种能源数据转化成标准煤数据后,分别与其对应的源排放因子乘积,得出能源 CO₂排放量,将各类能源的 CO₂排放量加总得出工业 CO₂排放量,即公式(6)

$$C = \sum_{j=1}^{18} E_j f_j (j = 1, 2, \dots, 18) \quad (6)$$

其中 C 为工业部门的 CO₂排放总量, E_j 为第 j 种能源转化成标准煤之后的消耗量, f_j 表示第 j 种能源的 CO₂排放因子^[43], j 表示《中国能源统计年鉴》统计的 18 种能源(包含二次能源)形式,其中 16 种固定能源形式的 CO₂排放因子参考 IPCC 测算方法,同时本文参照王雪松等(2015)做法,热能 CO₂排放系数根据《中国电力年鉴 2010—2014》测算,电力能源消耗的间接排放因子采用煤炭排放因子来近似估算^[44]。

4 实证结果及分析

4.1 长江经济带三个子系统效率结果分析

4.1.1 长江经济带工业经济子系统效率结果分析

从图 4 可以看出,2009—2013 年,长江经济带工业经济子系统效率变化不大,整体相对稳定。从区域比较来看,经济子系统效率表现出“下游最高,上游最低”的状况。

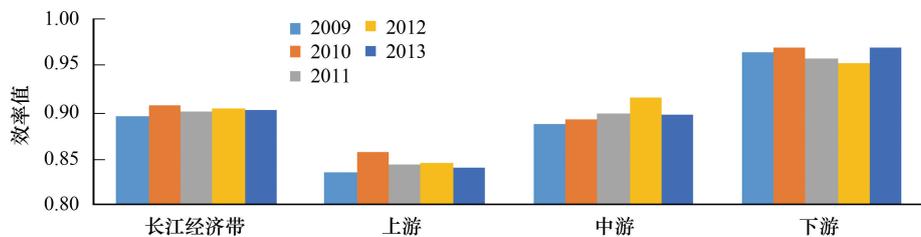


图 4 长江经济带工业经济子系统效率

Fig.4 The industrial economic subsystem efficiency of Yangtze River economic belt

长江经济带上游工业经济子系统效率最低,主要是上游工业资本投入不足、工业发展对能源依赖性较强、产出相对较低。从投入方面来看,2013 年上游工业资本投入仅为 14680.1 亿元,低于下游的 34784.6 亿元,相反,工业能耗强度为 1.10 吨标准煤/万元,远高于下游的 0.54 吨标准煤/万元;在产出方面,2013 年上游工业产值年均增长了 18.14%,低于下游的 28.82%。

长江经济带下游工业经济子系统效率最高,主要是由于下游工业经济增长以科技创新驱动为主、工业经济的投入-产出效率相对较高。从投入来看,下游工业研发投入年均增长率为 8.22%,高于劳动力投入年均增长率;从产出来看,2013 年其工业总产值达 25.9 万亿元,年均增长为 11.3%,高于科技研发、劳动力投入增长率。

4.1.2 长江经济带工业环境子系统效率测算及分析结果

从图 5 可以看出,长江经济带环境子系统效率水平呈递增趋势但增幅较小,年均增长 1.91%。从区域比较来看,环境子系统效率表现为“下游最高、中游最低”的状况。

长江经济带中游环境子系统效率最低,主要是环境治理资本投入不足且污染物排放量大,同时环境治理效果不显著。2009—2013 年中游年均环境污染治理资本投入为 43.97 亿元,分别低于上游的 46.63 亿元、下游的 85.93 亿元,环境治理资本投入明显较低;2009—2013 年工业 SO₂排量中游为 707 万吨,高于上游的 270 万吨、下游的 230 万吨,污染物排放量远高于上、下游。而环境治理效果方面,2009—2013 年中游工业 SO₂年均排放达标率为 90.77%,分别低于上游和下游 3.32 个百分点、6.95 个百分点。

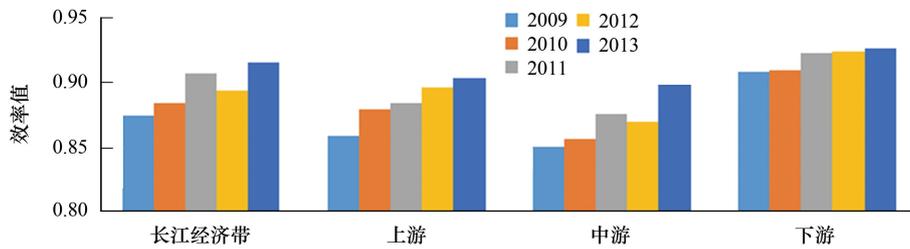


图5 长江经济带环境子系统效率

Fig.5 Environment subsystem efficiency of Yangtze River economic belt

长江经济带下游环境子系统效率最高,主要是其环境治理投入量大且治理效果明显。在环境治理方面,2009—2013年下游平均每年环境污染治理投入为85.97亿元,均高于中上游。环境治理效果方面工业废水达标率、工业SO₂排放达标率最高,分别为97.58%、97.72%。

4.1.3 长江经济带能源子系统生态效率测算结果与分析

从图6可以看出,长江经济带能源子系统效率整体呈上升趋势但增长幅度较小,年均增长1.32%。从区域比较来看,能源子系统效率水平表现为“下游最高、上游最低”的状况。

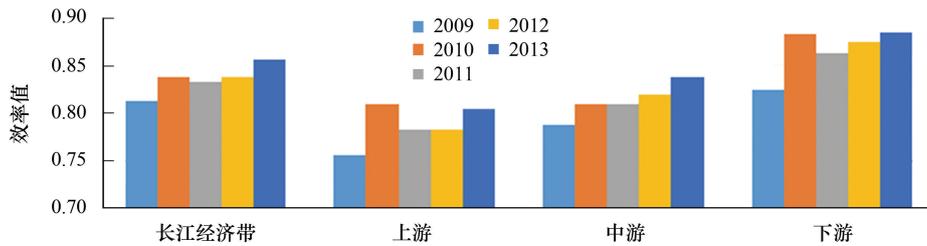


图6 长江经济带能源子系统效率

Fig.6 Energy subsystem efficiency of Yangtze River economic belt

长江经济带上游能源子系统效率最低,主要是能源行业资本投入力度不足、能源再利用率水平不高且能源消耗成本较高。就投入来说,2009—2013年上游能源行业资本投入均量为1365.4亿元,低于上游的1932.4亿元、下游的3081.2亿元;上游工业固体综合利用率为58.24%,低于中游的89.87%及下游的91.86%。从产出来看,2013年上游工业能耗强度为1.10吨标准煤/万元,高于中游的0.66吨标准煤/万元及下游的0.54吨标准煤/万元,同时,2013年上游CO₂排放量高达63.5万吨,高于下游地区11万吨。

长江经济带下游能源子系统效率最高,主要是下游能源利用率高、能源利用成本较低等优势。就投入来说,下游2009—2013年能源行业资本投入均量为3081.2亿元,高于中、上游,工业固体综合利用率为91.86%,高于中、上游水平。从产出来看,下游工业能源强度较低,为0.54吨标准煤/万元,而且,2009—2013年下游平均CO₂排放量也相对较低,为56.7万吨,低于上游9.8万吨。

4.2 长江经济带工业生态效率结果分析

如图7所示,2009—2013年长江经济带工业生态效率水平偏低且呈增长趋势,其效率均值为0.8775,年均增长0.84%。

对长江经济带上、中、下游而言,2009—2013工业生态效率以下游最高、中游次之、上游最低,其效率均值分别为0.8508、0.8617、0.9162,且呈增长趋势但增幅较小,其年均增长率分别为0.56%、0.82%、0.62%。2009—2013年上、中游的工业生态效率低于整体水平,分别低0.0267、0.0158;仅下游工业生态效率高于整体水平,高出0.0387。

由5.1的3个子系统及5.2工业生态系统分析来看,就区域而言上、中游工业生态效率水平较低,就系统而言能源子系统效率较低,表明长江经济带工业经济发展,以粗放式为主及区域发展不平衡。2009—2013年

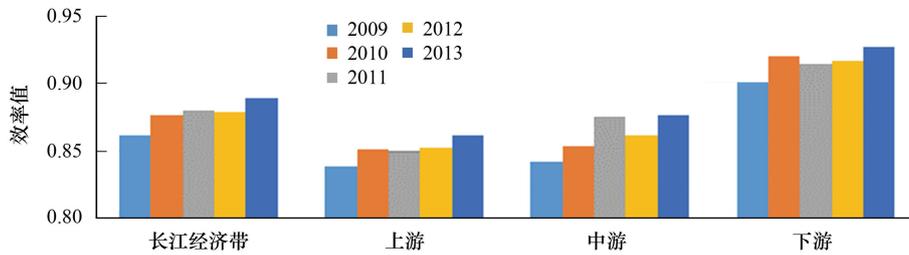


图7 长江经济带工业生态效率

Fig.7 The industrial eco-efficiency of Yangtze River economic belt

上游工业生态效率较低,主要是经济、能源子系统效率较低;2009—2013年中、下游工业生态效率较低,主要是能源子系统效率水平较低。

4.3 工业生态效率的收敛性检验

由上述分析,可以看出上、中、下游工业生态效率存在显著差异,随时间推移上、中、下游及整个区域的工业生态效率的离散状态如何。因此,利用 σ 收敛检验^[44],具体公式如下:

$$\sigma_i = \sqrt{N^{-1} \sum_{m=1}^N \{R_m(t) - [N^{-1} \sum_{m=1}^N R_k(t)]\}^2} \quad (7)$$

式中: $R_m(t)$ 表示第 m 省市 t 时期的工业生态效率值, N 表示长江经济带或者上、中、下游区域内省市的数量。当 $\sigma_{i+1} < \sigma_i$ 时,表示某区域内不同省市的工业生态效率差距在缩小,呈现收敛状态,反之为发散状态。2009—2013年上、中、下游及长江经济带,三个子系统及工业生态效率的收敛性结果如下。

如图8所示,2009—2013年长江经济带工业经济子系统效率空间差异基本稳定;上、中游工业经济子系统效率空间差异存在但基本稳定;下游工业经济子系统效率空间差异,2012年达到最大,之后有缩小趋势,表明长江经济带9省2市的工业经济子系统效率趋于稳定;上、中游各省市之间效率水平存在差异但差异不大;下游安徽与上海等省市相比差异性较大且逐渐缩小。

如图9所示,2009—2013年长江经济带整体及下游地区的环境子系统效率空间差异呈缩小趋势,中、上游环境子系统效率空间差异基本稳定,表明长江经济带9省2市工业经济更要注重生态环境保护,提升环境子系统效率水平;中、上游各省市环境治理存在差异但水平相当;下游地区的安徽,成为上游省市产业转移首选之地,同时环境投入水平与上海等省市存在较大差异。

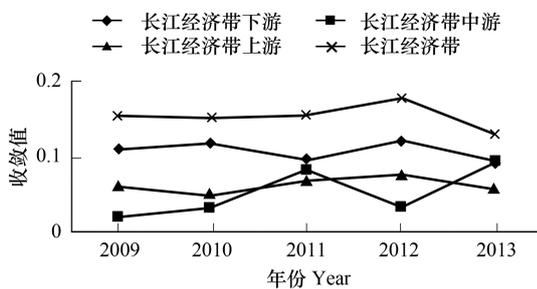


图8 工业经济子系统效率收敛值

Fig.8 The industrial economic subsystem efficiency convergence value

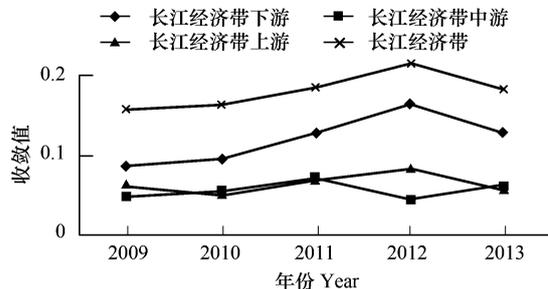


图9 环境子系统效率收敛值

Fig.9 Environment subsystem efficiency convergence value

如图10所示,2009—2013年长江经济带及下游,能源子系统效率空间差异呈扩大趋势;中、上游能源子系统效率空间差异基本稳定,表明长江经济带能源消耗及利用效率水平存在较大差异,下游各省市能源效率水平差异性变化较大,中、上游各省市相对稳定。

如图 11 所示,2009—2013 年长江经济带及下游工业生态空间效率差异增大趋势,中、上游工业生态系统空间效率差异相对稳定,表明工业生态效率水平有较大的改善空间,且下游个别省市工业生态效率水平提升相对其它区域省市较快。同时中、上游各省工业生态效率水平虽然有所改善但差异性并不大。

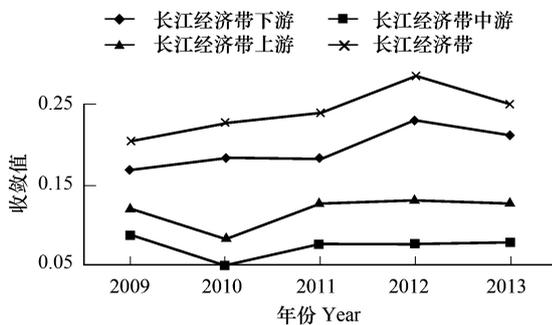


图 10 能源子系统效率收敛值

Fig.10 Energy Efficiency subsystem convergence value

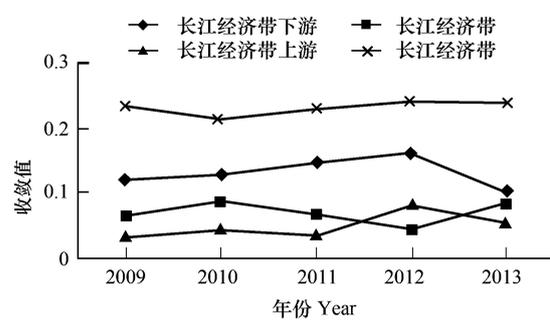


图 11 工业生态效率收敛值

Fig.11 Eco-efficiency of the industrial convergence value

5 研究结论及政策建议

5.1 研究结论

长江经济带工业生态效率水平较低且呈增长趋势,2009—2013 年工业生态效率均值为 0.8775,年均增长 0.63%;区域工业生态效率水平以下游最高、中游次之、上游最低。

长江经济带上、中、下游工业经济、能源、环境三个子系统效率存在显著差异。工业经济、能源子系统效率水平,以下游最高、中游次之、上游最低;环境子系统效率水平,以下游最高、上游次之、中游最低。可以看出长江经济带能源、环境系统效率低,造成工业生态效率水平较低。

本文对长江经济带工业经济、环境、能源三个子系统进行收敛性分析:工业经济子系统收敛性基本稳定,环境、能源子系统和工业生态系统处于收敛状态;中、上游三个子系统效率值收敛性基本稳定,下游三个子系统呈收敛趋势。

5.2 政策建议

总体来看,长江经济带 9 省 2 市工业生态系统处于无效率状态且改善空间较大。因此,9 省 2 市的工业经济发展与生态环境保护应置于同等重要地位。长江经济带重点发展清洁型产业,建立工业发展指导目录;制定产业转移环境负面清单,实施下游地区产业向中上游转移,严格限制污染型产业转移。基于工业经济子系统收敛稳定性,9 省 2 市实施财政补贴和税收优惠政策,采用低碳、节能、环保技术以高新技术产业发展为重心,不断降低能源强度和污染物排放强度,增强工业经济与能源、环境影响的脱钩力度。

对上游地区而言,工业生态效率低于中、下游;而上游工业经济和能源子系统效率水平也低于中、下游。因此,上游以发展生态环保产业,缩小与其它地区的经济差距为首要任务,兼顾生态环境保护。上游重点提高工业经济子系统效率,加强工业行业资本、研发以及人员的投入,提高废弃物综合利用率,降低非合意产出,减少单位能耗;提高能源子系统效率,加大对能源资本的投入,减少碳排放量,降低工业能耗量。

对中游地区而言,工业生态效率低于下游地区及整体平均水平;而中游环境和能源子系统效率偏低。因此中游地区在承接产业转移时,实施节能减排和清洁生产措施,控制工业污染物排放,降低单位产值能耗。实施严格的清洁生产方式,推进区域绿化和基础设施建设,提高区域生活和生产污染无害处理程度,推动工业产业转型,优化工业产业结构,淘汰落后、污染产业,加大科技创新投入,实施科技创新推动产业绿色发展。

对下游地区而言,工业生态效率较高但能源子系统效率相对较低。因此,下游地区重在提高能源综合利用水平,强化服务性产业贡献力,严格控制工业污染物排放总量,降低单位能耗,减少碳排放量。加强科技创

新驱动工业绿色发展。

对长江经济带而言,工业生态效率总体不高且三个子系统效率水平相当。长江经济带工业生态系统,要更注重工业增长方式,推动工业绿色循环发展,优化区域工业布局,推动工业创新协调发展。强化自身制度创新、技术创新、管理创新来支撑产业承接转移,重点布局战略性新兴产业,推动产业转型升级;同时设置生态保护“红线”,完善生态环境保护制度。

参考文献 (References):

- [1] 任胜钢,袁宝龙. 长江经济带产业绿色发展的动力找寻. 改革, 2016, (07): 55-64.
- [2] 污染企业下游被关停上游当“贵宾”. (2016-6-30). http://dz.jjckb.cn/www/pages/webpage2009/html/2016-06/30/content_20708.htm
- [3] 张雪梅. 西部地区生态效率测度及动态分析——基于 2000-2010 年省际数据. 经济理论与经济管理, 2013, (2): 78-85.
- [4] 李胜兰, 初善冰, 申晨. 地方政府竞争、环境规制与区域生态效率. 世界经济, 2014, (4): 88-110.
- [5] Arcelus F J, Arocena P. Productivity differences across OECD countries in the presence of environmental constraints. *Journal of the Operational Research Society*, 2005, 56(12): 1352-1362.
- [6] Zhou P, Ang B W, Poh K L. Measuring environmental performance under different environmental DEA technologies. *Energy Economics*, 2008, 30(1): 1-14.
- [7] Rashidi K, Shabani A, Saen R F. Using data envelopment analysis for estimating energy saving and undesirable output abatement: a case study in the Organization for Economic Co-Operation and Development (OECD) countries. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 105: 241-252.
- [8] 成金华, 孙琼, 郭明晶, 徐文赟. 中国生态效率的区域差异及动态演化研究. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(1): 47-54.
- [9] 潘兴侠, 何宜庆, 胡晓峰. 区域生态效率评价及其空间计量分析. 长江流域资源与环境, 2013, 22(5): 640-646.
- [10] 范凤岩, 雷涯邻. 能源、经济和环境(3E)系统研究综述. 生态经济, 2013, 12: 42-48.
- [11] 崔立志. 能源-经济和环境作用机制及其实证分析. 工业技术经济, 2013, 23(1): 32-40.
- [12] 黄新焕, 王文平, 蔡彬清. 我国能源-经济-环境系统协调发展评价. 统计与决策, 2015, (9): 68-70.
- [13] 王锋, 傅利芳, 秦豫徽. 省域“能源-经济-环境”(3E)系统协调度的时空差异与趋势预测. 山西财经大学学报, 2016, 38(6): 15-27.
- [14] 曾嵘, 魏一鸣, 范杰, 李之杰, 徐伟宣. 人口、资源、环境与经济协调发展系统分析. 系统工程理论与实践, 2000, 20(12): 1-6.
- [15] Schaltegger S, Sturm A. Ökologische Rationalität: ansatzpunkte zur ausgestaltung von ökologieorientierten managementinstrumenten. *Die Unternehmung*, 1990, 35(3): 273-290.
- [16] WBCSD. Eco-efficiency: Creating more value with Less Impact. Geneva: World Business Council for Sustainable Development, 2000: 5-36.
- [17] OECD Eco-efficiency. Paris: Organization for Economic Cooperation and Development, 1998: 7-11.
- [18] 王震, 石磊, 刘晶茹, 孙念. 区域工业生态效率的测算方法及应用. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(6): 121-126.
- [19] 高峰, 王金德, 郭政. 我国区域工业生态效率评价及 DEA 分析. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(3): 318-322.
- [20] Alves J L S, Medeiros D D D. Eco-efficiency in micro-enterprises and small firms: a case study in the automotive services sector. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 108(1): 595-602.
- [21] Caneghem J V, Block C, Hooste H V, Vandecasteele C. Eco-efficiency trends of the flemish industry: decoupling of environmental impact from economic growth. *Journal of Cleaner Production*, 2010, 18: 1349-1357.
- [22] Park H S, Behera S K. Methodological aspects of applying eco-efficiency indicators to industrial symbiosis network. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 64: 478-485.
- [23] Long X L, Zhao X C, Cheng F X. The comparison analysis of total factor productivity and eco-efficiency in China's cement manufactures. *Energy Policy*, 2015, 81: 61-66.
- [24] Burchart-korol D, Krawczyk P, Czaplicka-Kolarz K, Smoliński A. Eco-efficiency of underground coal gasification (UCG) for electricity production. *Fuel*, 2016, 173: 239-246.
- [25] Wang W, Jiang D, Chen D J., Chen Z B, Zhou W J, Zhu B. A material flow analysis (MFA)-based potential analysis of eco-efficiency indicators of China's cement and cement-based materials industry. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112(1): 787-796.
- [26] Zhang D F, Zhang Y. The driving forces and synergistic effect between regional economic growth, resources and the environment in the Yangtze River economic zone. *Journal of Resources and Ecology*, 2014, 5(3): 203-210.
- [27] 吴传清, 董旭. 长江经济带工业全要素生产效率分析. 武汉大学学报: 哲学社会科学版, 2014, 67(4): 31-36.
- [28] 吴传清, 董旭. 环境约束下长江经济带全要素能源效率的时空差异研究-基于超效率 DEA 模型和 ML 指数法. 长江流域资源与环境, 2015, 24(10): 1646-1653.

- [29] 汪克亮, 孟祥瑞, 杨宝臣, 程云鹤. 基于环境压力的长江经济带工业生态效率研究. 资源科学, 2015, 37(7): 1491-1501.
- [30] 任毅, 丁黄艳, 任雪. 长江经济带工业能源效率空间差异化特征与发展趋势-基于三阶段 DEA 模型的实证研究. 经济问题探索, 2016, (3): 93-100.
- [31] Charnes A, Cooper W W. Measuring the efficiency of decision making units. European Journal of Operational, 1979, 3(4): 429-444.
- [32] Charnes A, Cooper W W. Foundation of data envelopment analysis for Pareto-Koopmans efficient empirical production functions. Journal of Econometrics, 1985, 30: 91-107.
- [33] Sengupta J K. A fuzzy systems approach in DEA. Computer and Mathematics with Application, 1992, 24(8,9): 259-266.
- [34] 程昀, 杨印生. 矩阵型网络 DEA 模型及其实证检验. 中国管理科学, 2013, 21(5): 103-109.
- [35] Kao C. Efficiency measurement for parallel production systems. European Journal of Operational Research, 2009, 196: 1107-1112.
- [36] 苏静, 胡宗义, 唐李伟. 我国能源-经济-环境(3E)系统协调度的地理空间分布与动态演化. 经济地理, 2013, 33(9): 19-25.
- [37] 高珊, 黄贤金. 基于绩效评价的区域生态文明指标体系构建—以江苏省为例. 经济地理, 2010, 30(5): 823-828.
- [38] 陈黎明, 邓玲玲. 我国 3E 系统协调度测度及其影响因素分析. 统计与决策, 2012, (16): 126-129.
- [39] 刘衍君, 张保华, 曹建荣, 陈伟. 省域生态文明评价体系的构建—以山东省为例. 安徽农业科学, 2010, 38(7): 3676-3678.
- [40] 孙晓梅, 崔兆杰, 朱丽, 刘雷. 生态工业园运行效率评价指标体系研究. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(1): 124-128.
- [41] 王锋, 傅利芳, 秦豫徽. 省域“能源-经济-环境”(3E)系统协调度的时空差异与趋势预测. 山西财经大学学报, 2016, (6): 15-27.
- [42] 王恩旭, 武春友. 基于超效率 DEA 模型的中国省际生态效率时空差异研究. 管理学报, 2011, 8(3): 443-450
- [43] Yuan B L, Ren S G, Chen X H. The effects of urbanization, consumption ratio and consumption structure on residential indirect CO₂ emissions in China: a regional comparative analysis. Applied Energy, 2015, 140: 94-106.
- [44] 王雪松, 任胜钢, 袁宝龙, 付祥. 基于 LMDI 方法的我国制造业发展与 CO₂ 排放脱钩关系研究. 中南大学学报: 社会科学版, 2015, (4): 138-144.
- [45] 曾先锋, 李国平. 我国各地区的农业生产率与收敛:1980-2005. 数量经济技术经济研究, 2008, (5): 82-93.