

共享产出关联视角下中国工业企业绿色研发投入效率测度与分解

郑建锋 王应明¹

(福州大学 经济与管理学院, 福建 福州 350108)

【摘要】: 绿色研发投入活动是整个绿色创新链的前端环节, 工业企业的绿色研发投入是中国进行绿色创新的重要阶段。通过构建包含共享投入、共享产出和中间产出的两阶段 DEA 模型, 从技术开发和经济转化两阶段视角出发, 对中国 31 个省份的工业企业绿色研发投入效率进行研究, 结果表明: 中国工业企业绿色研发投入效率整体水平偏低, 区域发展差异较低, 东部地区的整体水平明显高于东北部、西部和中部地区; 经济转化的效率均值优于技术开发的效率均值, 技术开发效率水平低下是绿色研发投入整体效率水平低下的主要原因。

【关键词】: 共享产出 两阶段 DEA 绿色研发投入

【中图分类号】: F425; F062.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2021)03-061-07

创新是引领经济发展的第一动力, 是促进经济高质量、绿色发展的核心力量。绿色创新对于促进国家的社会经济发展、生态文明建设、民生改善等各方面都起到重要的作用。在当前生态环境日益恶劣的形势下, 世界各国纷纷通过增加绿色研发投入等活动来提高工业企业绿色创新能力, 把绿色创新作为产业结构升级和企业竞争力提升的重要途径。绿色研发投入作为研发支出中与环境保护、资源保护以及绿色产品开发设计的有关部分, 直接对企业的绿色技术创新能力与竞争优势产生影响, 是工业企业进行绿色创新必要的前提条件之一^[1]。绿色研发投入在很大程度上影响着工业企业绿色创新活动的进行, 如果绿色研发投入的效率低, 会直接导致工业企业的经济发展与生态环境之间的矛盾日益加重, 进而影响国家可持续的健康发展。因此, 在生态环境的压力下, 对中国 31 个省份 (不含港澳台地区, 下同) 工业企业绿色研发投入效率进行测度研究, 分析各个省份效率的区域差异并找出原因, 有利于提升工业企业的绿色创新效率和能力, 从而促进中国区域科技、经济和环境的协调发展。

长期以来, 国内外学者比较多地关注国家和企业层面的研发投入影响因素和改善的问题, 相比之下, 研发效率的研究比较缺乏, 更不用说落实到绿色研发投入效率的问题上。研发投入效率可以看作是可度量的研发投入与成果产出之间的转化关系^[2]。因此, 可以从研究的角度出发, 研究研发投入效率的内涵, 把研发投入效率看作是一种技术效率的表现。目前, 在研发投入效率的测度与分解上主要有两类方法, 分别是非参数方法和参数方法。

非参数方法以 Charnes 等^[3]于 1978 年提出的数据包络分析 (data envelopment analysis, DEA) 为代表。早期的学者通过简单的 DEA-C2R 模型或者 DEA-C2GS2 模型来分析企业的研发效率^[4-5]。这些简单的 DEA 模型虽然可以测度研发投入的效率, 但是如果出现多个同时有效的决策单元时, 就无法做出进一步的评价与比较。之后的学者为了解决同时出现有效决策单元的问题, 运用超效率 DEA 模型结合 Malmquist 指数的方法进行研发效率研究^[6-7]。但是这些模型在进行效率测度的时候忽略了研发投入效率系统的

作者简介: 郑建锋, 硕士研究生, 研究方向为科技创新管理、数据包络分析。E-mail: 927317715@qq.com

王应明, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为数据包络分析、绩效评价与决策。E-mail: ymwang@fzu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目“大数据环境下置信规则库推理模型优化与应用研究”(61773123); 国家自然科学基金项目“考虑决策单元空间相关性的生产效率分析与资源优化配置研究”(71701050)

复杂性,把研发过程看成一个“黑箱”,不能真实体现内在的生产效率。目前众多学者关注到研发投入或者技术创新的分阶段效率研究,认为研发或者创新过程都可以分为两个阶段。王博等^[8]构建出一种新型的网络 DEA 模型,对我国 28 个省级区域的 R&D 活动进行测算和分解,得到不同区域的 R&D 活动的整体效率、技术研发阶段效率、技术消化吸收阶段效率。孙丝雨和安增龙^[9]增加径向基的新技术网络 DEA 模型对中国 30 个省份工业企业绿色技术创新效率进行分析,并将其分解为科技研发效率和成果转化效率。结果表明,相比于其他两阶段 DEA 模型,具有共享投入和自由中间产出的两阶段 DEA 模型更符合研发投入效率的特点。

参数方法以 Aigner 等^[10]于 1977 年提出的随机前沿分析(stochastic frontier approach, SFA)为代表。随机前沿分析法采用计量方法对前沿生产函数进行估计,依赖于对数据的随机性假设,在测量随机误差和统计干扰处理上具有优势。陈修德和梁彤缨^[11]建立不考虑和考虑影响因素的面板数据随机前沿生产函数(SFPF)模型对研发中间产出效率与最终产出效率进行测算。王成东^[12]在考虑内生投入因素和外部环境因素的基础上,通过 SFA 模型对区域产业研发效率进行测度。参数方法在考虑外界环境影响上具有很大的优势,但是无法对技术效率进一步分解,而且无法考虑共享投入和共享产出等约束条件。

目前也有学者开始同时采用非参数和参数方法进行研发效率测度,冯海波和葛小南^[13]消除外部环境因素和内部随机误差的影响,通过三阶段 DEA-Malmquist 指数法对中国地方政府 R&D 投入效率进行测算,结果表明剔除环境因素后的研发效率得到显著提升。岳意定等^[14]为了克服三阶段 DEA 模型的缺点,提出了一种基于随机前沿分析技术的四阶段模型得到动态经营管理效率,为之后优化资源配置方面提供了很好的参考。目前的研究证实了非参数方法和参数方法能很好地契合,更能全面地反映出系统的复杂性,但是同样无法考虑共享投入和产出视角下的效率测度。

基于以上的文献考查,本文将采用参数方法对绿色研发效率进行测度和分解。首先,设计符合工业企业特点的绿色研发生产过程,确定指标和数据来源;其次,构建一种新型的共享投入/产出关联型两阶段 DEA 模型^[15],对同时具有共享投入/产出和中间产出的系统效率进行评价并进行两阶段分解;最后,将中国 31 个省份的数据代入模型,分析各个省份工业企业的绿色研发投入效率,在此基础上提出相应的改善建议。

1 变量选取及模型构建

1.1 变量选取

依据创新价值链理论原理并沿袭冯志军和陈伟^[16]的做法,将研发创新过程分为技术开发过程和经济转化过程两个子阶段。并考虑以下两个方面:第一,技术开发过程和经济转化过程共享原始投入;第二,测量技术开发过程的中间产出作为经济转化的中间投入,部分中间产出作为上一年经济转化的共享产出。通过选取适当的指标对各个省份工业企业的整体以及子阶段的绿色研发效率进行研究。

对工业企业来说,进行绿色研发活动时投入的资源就是通过各种途径能够获得的人力和财力。人力一般指工业企业所雇佣的技术研发和成果转化的人员,而财力是指企业能够提供研发活动和成果转化所使用的资金;另外,研发产出包括直接经济产出和间接经济产出,在绿色研发效率中需要额外考虑环境的指标。本文主要借鉴冯志军和陈伟^[16]、冯志军^[17]、Noailly & Ryfisch^[18]、Stucki & Woerter^[19]等的研究文献,选用以下投入与产出变量代入模型计算。

从初始的共享投入来看。第一,采用工业企业研发活动人员折合全时当量作为衡量投入资源的指标之一;第二,由于研发活动属于知识生产过程,研发产出不仅取决于当期的研发投入,还依赖于过去时期的研发投入,所以衡量财力的投入指标应该是研发经费存量。研发投入经费存量采用永续盘存法,如公式(1)所示:

$$RD_{it} = E_{it} + (1 - \delta)RD_{it-1} \quad (1)$$

式中: RD_{it} 表示 i 省份在 t 年的研发经费存量, $E_{i(t-1)}$ 表示 i 省份在 $t-1$ 年经折现的研发经费存量, δ 表示研发经费的折旧率 (按 $\delta = 15\%$ 算)。

研发经费的期初值表示见公式 (2):

$$RD_{i0} = E_{i0} / (g + \delta) \quad (2)$$

式中: E_{i0} 为初始年份研发经费支出量, g 为研究时段内研发经费支出的年平均增长量。基年定为 2012 年。

从产出来看。第一, 选取绿色专利申请数和绿色专利授权量分别作为技术开发的中间产出和经济转化的最终产出, 能够反映工业企业拥有自主知识产权技术的核心指标, 同时也能体现工业企业的绿色研发能力^[20]。第二, 选取新产品产值作为当年技术开发与上一年经济转化的共享产出, 因为不是所有的研发都进行专利申请, 而是直接成为新产品的产值^[21]。第三, 选取各省份工业企业的工业废水排放量、工业二氧化硫排放量、工业固体废物产生量等指标, 并采用熵值法对 3 个污染指标进行负向化处理, 得到各个省份工业企业的环境污染指数。最终得到如图 1 所示的我国区域工业企业绿色研发两阶段生产过程示意图。

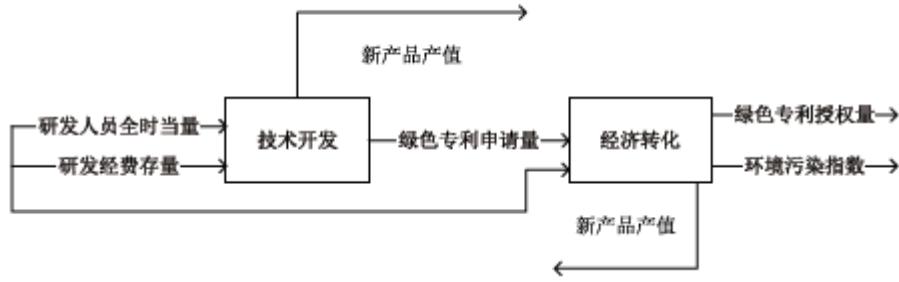


图 1 我国区域工业企业绿色研发两阶段生产过程示意图

由于绿色研发从最开始的投入到最终经济的转化通常存在一定的时滞, 因此本文的分析过程中技术开发投入、中间产出, 共享产出、经济转化最终产出分别采用 2013—2016 年、2014—2017 年、2015—2018 年的数据。数据来源于 2013—2018 年的《中国科技统计年鉴》《中国工业统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国城市统计年鉴》。

1.2 模型构建

如图 2 所示, 以各省份 DMU_i 为决策单元, 假设有 a 种共享原始投入, b 种中间产出, c 种经济转化最终产出, d 种共享产出。

$\mu_g^1(t)$ 和 $\mu_g^2(t)$ 分别是第 t 年共享原始投入 $x_{ig}(t)$ 在技术开发过程和经济转化过程中的权重, $g=1, 2, \dots, a$; $\beta_{ig}(t)$ 和 $1-\beta_{ig}(t)$ 分别为原始投入在 $x_{ig}(t)$ 技术开发过程和经济转化过程中的配置比; $v_g^1(t+1)$ 和 $v_g^2(t+1)$ 分别表示第 $(t+1)$ 年中间产出 $y_{it}(t+1)$ 在两个阶段的权重, $\alpha_{ik}^1(t+1)$ 和 $\alpha_{ik}^2(t+2)$ 分别为在第 $(t+1)$ 年技术开发的共享产出 $s_{ik}(t+1)$ 和在第 $(t+2)$ 年经济转化共享产出 $s_{ik}(t+2)$ 的权重, $k=1, 2, \dots, d$; $\alpha_{in}(t+1)$ 和 $1-\alpha_{in}(t+2)$ 同样表示共享产出在各个阶段的配置比; $w_{in}(t+2)$ 为第 $(t+2)$ 年最终产出 $z_{in}(t+2)$ 的权重, $n=1, 2, \dots, c$ 。由于具有规模无效的影响, 所以在投入项中添加规模无效项 $m_i^1(t)$ 、 $m_i^2(t)$ 。

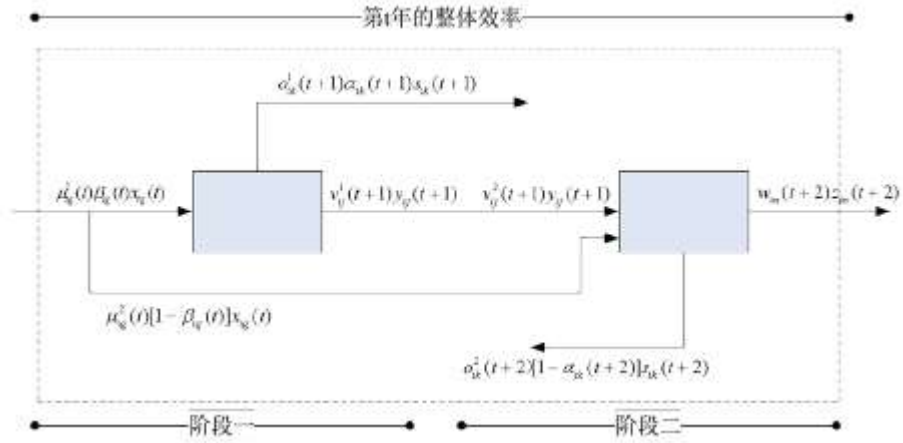


图 2 共享投入/产出的两阶段研发系统结构概念模型

基于规模报酬可变假设，第 t 年的整体效率为：

$$E_{t(t)} = \frac{\sum_{j=1}^b v_{ij}^1(t+1)y_{ij}(t+1) + \sum_{k=1}^d o_{ik}^1(t+1)\alpha_{ik}(t+1)s_{ik}(t+1) + \sum_{k=1}^d o_{ik}^2(t+2)[1-\alpha_{ik}(t+2)]s_{ik}(t+2) + \sum_{n=1}^c w_{in}(t+2)z_{in}(t+2)}{\sum_{g=1}^a \mu_{ig}^1(t)\beta_{ig}(t)x_{ig}(t) + \sum_{g=1}^a \mu_{ig}^2(t)[1-\beta_{ig}(t)]x_{ig}(t) + \sum_{j=1}^b v_{ij}^2(t+1)y_{ij}(t+1) + m_i^1(t) + m_i^2(t)} \rightarrow \quad (3)$$

式中： $i=1, 2, \dots, e$ 。

令： $\varphi = \frac{1}{\sum_{g=1}^a \mu_{ig}^1(t)\beta_{ig}(t)x_{ig}(t) + \sum_{g=1}^a \mu_{ig}^2(t)[1-\beta_{ig}(t)]x_{ig}(t) + \sum_{j=1}^b v_{ij}^2(t+1)y_{ij}(t+1) + m_i^1(t) + m_i^2(t)}$ ，借助 Charnes-Cooper 转换，绿色研发整体效率的数学规划模型为：

$$\begin{aligned}
\max E_{i(t)} = & \sum_{j=1}^b \overline{v_{ij}^1}(t+1)y_{ij}(t+1) + \sum_{k=1}^d \overline{o_{ik}^1}(t+1)\alpha_{ik}(t+1)s_{ik} \\
& (t+1) + \sum_{k=1}^d \overline{o_{ik}^2}(t+2)[1-\alpha_{ik}(t+2)]s_{ik}(t+2) + \\
& \sum_{n=1}^c \overline{w_{in}}(t+2)z_{in}(t+2) \\
s.t. \quad & \sum_{g=1}^a \overline{\mu_{ig}^1}(t)\beta_{ig}(t)x_{ig}(t) + \sum_{g=1}^a \overline{\mu_{ig}^2}(t)[1-\beta_{ig}(t)]x_{ig}(t) + \\
& \sum_{j=1}^b \overline{v_{ij}^2}(t+1)y_{ij}(t+1) + \overline{m_i^1}(t) + \overline{m_i^2}(t) = 1 \\
& \sum_{g=1}^a \overline{\mu_{ig}^1}(t)\beta_{ig}(t)x_{ig}(t) - \sum_{j=1}^b \overline{v_{ij}^1}(t+1)y_{ij}(t+1) - \\
& \sum_{k=1}^d \overline{o_{ik}^1}(t+1)\alpha_{ik}(t+1)s_{ik}(t+1) + \overline{m_i^1}(t) \geq 0 \\
& \sum_{g=1}^a \overline{\mu_{ig}^2}(t)[1-\beta_{ig}(t)]x_{ig}(t) + \sum_{j=1}^b \overline{v_{ij}^2}(t+1)y_{ij}(t+1) - \\
& \sum_{k=1}^d \overline{o_{ik}^2}(t+2)[1-\alpha_{ik}(t+2)]s_{ik}(t+2) - \\
& \sum_{n=1}^c \overline{w_{in}}(t+2)z_{in}(t+2) + \overline{m_i^2}(t) \geq 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
0 < \beta_{ig}(t) \leq 1; 0 < \alpha_{ik}(t) \leq 1; \overline{\mu_{ig}^1}(t), \overline{\mu_{ig}^2}(t), \overline{v_{ij}^1}(t+1), \overline{v_{ij}^2}(t+1), \\
\overline{o_{ik}^1}(t+1), \overline{o_{ik}^2}(t+2), \overline{w_{in}}(t+2) \geq \varepsilon
\end{aligned} \quad (4)$$

模型中, $\overline{\mu_{ig}^1}(t) = \varphi \mu_{ig}^1(t)$, $\overline{\mu_{ig}^2}(t) = \varphi \mu_{ig}^2(t)$, $\overline{v_{ij}^1}(t+1) = \varphi v_{ij}^1(t+1)$, $\overline{v_{ij}^2}(t+1) = \varphi v_{ij}^2(t+1)$, $\overline{o_{ik}^1}(t+1) = \varphi o_{ik}^1(t+1)$, $\overline{o_{ik}^2}(t+2) = \varphi o_{ik}^2(t+2)$, $\overline{w_{in}}(t+2) = \varphi w_{in}(t+2)$ 。为了防止决策变量 $\overline{\mu_{ig}^1}(t)$, $\overline{\mu_{ig}^2}(t)$, $\overline{v_{ij}^1}(t+1)$, $\overline{v_{ij}^2}(t+1)$, $\overline{o_{ik}^1}(t+1)$, $\overline{o_{ik}^2}(t+2)$, $\overline{w_{in}}(t+2)$ 的最优值为 0, 它们的下界被限定为 ε , 即非阿基米德无穷小, 设

方便计算, 令 $p_{ig}^1(t) = \overline{\mu_{ig}^1}(t)\beta_{ig}(t)$, $p_{ig}^2(t) = \overline{\mu_{ig}^2}(t)[1-\beta_{ig}(t)]$, $f_{ik}^1(t+1) = \overline{o_{ik}^1}(t+1)\alpha_{ik}(t+1)$, $f_{ik}^2(t+2) = \overline{o_{ik}^2}(t+2)\alpha_{ik}(t+2)$, 则非线性模型化为易求解的等价的线性规划模型为:

$$\begin{aligned}
\max E_{i(t)} = & \sum_{j=1}^b \overline{v_{ij}^1}(t+1)y_{ij}(t+1) + \sum_{k=1}^d f_{ik}^1(t+1)s_{ik}(t+1) + \\
& \sum_{k=1}^d \overline{o_{ik}^2}(t+2)s_{ik}(t+2) - \sum_{k=1}^d f_{ik}^2(t+2)s_{ik}(t+2) + \\
& \sum_{n=1}^c \overline{w_{in}}(t+2)z_{in}(t+2) \\
s.t. \quad & \sum_{g=1}^a p_{ig}^1(t)x_{ig}(t) + \sum_{g=1}^a \overline{\mu_{ig}^2}(t)x_{ig}(t) - \sum_{g=1}^a p_{ig}^2(t)x_{ig}(t) + \\
& \sum_{j=1}^b \overline{v_{ij}^2}(t+1)y_{ij}(t+1) - \sum_{j=1}^b \overline{m_i^1}(t) + \overline{m_i^2}(t) = 1 - \sum_{k=1}^d f_{ik}^1(t+1)s_{ik} \\
& \sum_{g=1}^a p_{ig}^1(t)x_{ig}(t) - \sum_{j=1}^b \overline{v_{ij}^1}(t+1)y_{ij}(t+1) - \sum_{k=1}^d f_{ik}^1(t+1)s_{ik} \\
& (t+1) + \overline{m_i^1}(t) \geq 0 \\
& \sum_{g=1}^a \overline{\mu_{ig}^2}(t)x_{ig}(t) - \sum_{g=1}^a p_{ig}^2(t)x_{ig}(t) + \sum_{j=1}^b \overline{v_{ij}^2}(t+1)y_{ij} \\
& (t+1) - \sum_{k=1}^d \overline{o_{ik}^2}(t+2)s_{ik}(t+2) + \sum_{k=1}^d f_{ik}^2(t+2)s_{ik} \\
& (t+2) - \sum_{n=1}^c \overline{w_{in}}(t+2)z_{in}(t+2) + \overline{m_i^2}(t) \geq 0 \\
& 0 < \beta_{ig}(t) \leq 1; 0 < \alpha_{ik}(t) \leq 1; \overline{\mu_{ig}^1}(t) \geq p_{ig}^1(t) \geq \varepsilon; \\
& \overline{o_{ik}^1}(t+1) \geq f_{ik}^1(t+1) \geq \varepsilon; p_{ig}^2(t), f_{ik}^2(t+1), \overline{v_{ij}^1}(t+1), \\
& \overline{v_{ij}^2}(t+1), \overline{w_{in}}(t+2) \geq \varepsilon \tag{5}
\end{aligned}$$

求解模型（5）可以得到不同省份的整体绿色研发效率 $E_{i(t)}$ 和各个变量的最优解，在计算技术开发过程和经济转化过程效率时，根据最新文献可以发现目前有两种不一样的观点：陈倩倩等^[22]根据陈凯华和官建成^[23]的观点对创新效率进行评价时，采用最优解组合的方法计算科研创新和产品创新效率；熊曦等^[24]根据 Kao & Hwang^[25]的观点对科技创新效率的两阶段进行分解时，在保证整体效率最优不变的情况下，优先计算阶段一，然后在保证整体和阶段一最优前提下，计算阶段二。两种方法各有优缺点，为了简便计算，本文采用前者的研究方法对绿色研发投入效率进行分解。

根据模型（5）可以获得 $\overline{p_{ig}^1}(t)$, $\overline{p_{ig}^2}(t)$, $\overline{p_{ig}^1}(t+1)$, $\overline{f_{ik}^1}(t+1)$, $\overline{f_{ik}^2}(t+1)$, $\overline{v_{ij}^1}(t+1)$, $\overline{v_{ij}^2}(t+1)$, $\overline{w_{in}}(t+2)$ 的最优解组合，通过计算公式（3）和（4），对工业企业绿色研发投入效率进行分解，得到技术开发和经济转化两个阶段的子效率：

$$\begin{aligned}
E_{i(t)}^1 &= \frac{\sum_{j=1}^b v_{ij}^1(t+1)y_{ij}(t+1) + \sum_{k=1}^d o_{ik}^1(t+1)\alpha_{ik}(t+1)s_{ik}(t+1)}{\sum_{g=1}^a \mu_{ig}^1(t)\beta_{ig}(t)x_{ig}(t) + m_i^1(t)} \\
&= \frac{\sum_{j=1}^b \overline{v_{ij}^1}(t+1)y_{ij}(t+1) + \sum_{k=1}^d \overline{o_{ik}^1}(t+1)\alpha_{ik}(t+1)s_{ik}(t+1)}{\sum_{g=1}^a \overline{\mu_{ig}^1}(t)\beta_{ig}(t)x_{ig}(t) + \overline{m_i^1}(t)} \quad (6) \\
E_{i(t)}^2 &= \frac{\sum_{k=1}^d o_{ik}^2(t+2)[1-\alpha_{ik}(t+2)]s_{ik}(t+2) + \sum_{n=1}^c w_{in}(t+2)z_{in}(t+2)}{\sum_{g=1}^a \mu_{ig}^2(t)[1-\beta_{ig}(t)]x_{ig}(t) + \sum_{j=1}^b v_{ij}^2(t+1)y_{ij}(t+1) + m_i^2(t)} \\
&= \frac{\sum_{k=1}^d \overline{o_{ik}^2}(t+2)[1-\alpha_{ik}(t+2)]s_{ik}(t+2) + \sum_{n=1}^c \overline{w_{in}}(t+2)z_{in}(t+2)}{\sum_{g=1}^a \overline{\mu_{ig}^2}(t)[1-\beta_{ig}(t)]x_{ig}(t) + \sum_{j=1}^b \overline{v_{ij}^2}(t+1)y_{ij}(t+1) + \overline{m_i^2}(t)} \quad (7)
\end{aligned}$$

定理 1：绿色研发整体效率水平是技术开发和经济转化两个子阶段效率的凸线性组合。

证明：

$$\begin{aligned}
\text{令：} \quad \eta &= \sum_{g=1}^a \mu_{ig}^1(t)\beta_{ig}(t)x_{ig}(t) + \sum_{g=1}^a \mu_{ig}^2(t)[1-\beta_{ig}(t)]x_{ig}(t) + \\
&\sum_{j=1}^b v_{ij}^2(t+1)y_{ij}(t+1) + m_i^1(t) + m_i^2(t), \text{ 则有：} \\
E_{i(t)} &= \frac{\sum_{j=1}^b v_{ij}^1(t+1)y_{ij}(t+1) + \sum_{k=1}^d o_{ik}^1(t+1)\alpha_{ik}(t+1)s_{ik}(t+1) +}{\eta} \\
&\quad \frac{\sum_{k=1}^d o_{ik}^2(t+2)[1-\alpha_{ik}(t+2)]s_{ik}(t+2) + \sum_{n=1}^c w_{in}(t+2)z_{in}(t+2)}{\eta} \\
&= \frac{\sum_{g=1}^a \mu_{ig}^1(t)\beta_{ig}(t)x_{ig}(t) + m_i^1(t)}{\eta} \cdot \frac{\sum_{j=1}^b v_{ij}^1(t+1)y_{ij}(t+1) +}{\sum_{g=1}^a \mu_{ig}^1(t)\beta_{ig}(t)} \\
&\quad \frac{\sum_{k=1}^d o_{ik}^1(t+1)\alpha_{ik}(t+1)s_{ik}(t+1)}{x_{ig}(t) + m_i^1(t)} + \frac{\sum_{g=1}^a \mu_{ig}^2(t)[1-\beta_{ig}(t)]x_{ig}(t) +}{\eta} \\
&\quad \frac{\sum_{j=1}^b v_{ij}^2(t+1)y_{ij}(t+1) + m_i^2(t)}{\sum_{k=1}^d o_{ik}^2(t+2)[1-\alpha_{ik}(t+2)]s_{ik}(t+2) + \sum_{n=1}^c w_{in}(t+2)z_{in}(t+2)} \\
&= \psi^1 \cdot E_{i(t)}^1 + \psi^2 \cdot E_{i(t)}^2
\end{aligned}$$

这里的 ψ^1 和 ψ^2 代表了技术开发和经济转化子阶段的纯技术效率对整体纯技术效率贡献成熟度,反映了绿色研发投入在两个子阶段的分配比例满足 $\psi^1 + \psi^2 = 1$, 显然定理 1 成立。

2 实证研究

基于上述模型及相关公式,本文利用 Matlab 编程求解,计算中国 31 个省份的工业企业绿色研发投入整体效率、技术开发和经济转化过程的各阶段效率。

假设共享原始投入、共享产出、中间产出对两个子阶段的重要性是相同的,则有 $p_{ij}^1(t) = p_{ij}^2(t)$, $f_{ij}^1(t+1) = f_{ij}^2(t+1)$, $v_{ij}^1(t+1) = v_{ij}^2(t+1)$ 。求解结果如表 1 所示,根据表格结果对中国工业企业绿色研发投入整体效率和各个阶段效率进行分析。

(1) 中国区域工业企业绿色研发投入整体效率分析。

由表 1 的各个年份中的第 1 列可知,中国各区域工业企业的绿色研发投入效率水平较低,全国整体效率均值与发达国家相比处于低下水平,整体效率的均值最高仅为 0.584,明显还达不到先进的水平。在样本的考察期间内,整体效率均值前三位分别是广东、陕西和上海,这与孙丝雨和安增龙^[9]的结论大致相同,由表 1 可得它们的整体均值分别为 0.950、0.947、0.928。广东和上海都是我国经济发达地区,有良好的创新环境和较好的创新资源分配机制。在地方政府支持下,该区域的工业企业大胆转型,加大创新资源投入,不断推进产学研合作,促进了工业企业绿色研发发展,大大提高了工业企业绿色研发转化水平。陕西的经济资源条件虽然不及广东、上海等地,但是当地政府出台的人才政策,吸引了大量的人才投入陕西发展,优越的人才资源,促进了陕西工业企业的快速转型和创新,在一定程度上,实现了技术开发和经济转化的产出最大化。

本文将 31 个省份分为 4 个区域:东部地区、中部地区、东北部地区、西部地区。由表 1 所示,东部、中部、东北部、西部地区的整体效率均值分别为 0.655、0.351、0.572、0.483。东部地区的整体效率明显高于其他地区,区域之间的差异明显。由图 3 所示,各个区域总体上呈上涨趋势,在 2015 年东部地区、西部地区和全国均值出现了拐点,说明这一年中国大部分地区的工业企业绿色研发投入效率出现波动,呈现下降的走势。

(2) 中国区域工业企业绿色研发投入第一阶段(技术开发)效率分析。

表 1 2013—2016 年中国区域工业企业绿色研发投入效率评价结果

地区	2013 年			2014 年			2015 年			2016 年			均值		
	E	E ¹	E ²	E	E ¹	E ²	E	E ¹	E ²	E	E ¹	E ²	E	E ¹	E ²
北京	0.523	0.436	0.634	0.592	0.544	0.703	0.613	0.543	0.711	0.724	0.634	0.755	0.613	0.539	0.701
天津	0.778	0.619	0.937	0.821	0.781	0.937	0.629	0.534	0.716	0.734	0.598	0.871	0.741	0.633	0.865
河北	0.240	0.167	0.392	0.220	0.132	0.348	0.190	0.228	0.152	0.234	0.162	0.306	0.221	0.172	0.300
上海	0.798	0.712	1.000	0.913	0.826	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.928	0.885	1.000
江苏	0.376	0.271	0.392	0.413	0.214	0.568	0.469	0.309	0.527	0.499	0.476	0.523	0.439	0.318	0.503
浙江	0.513	0.368	0.658	0.568	0.651	0.550	0.601	0.357	0.615	0.699	0.546	0.733	0.595	0.481	0.639

福建	0.347	0.292	0.402	0.334	0.192	0.323	0.352	0.245	0.366	0.403	0.365	0.477	0.359	0.274	0.392
山东	0.784	0.712	0.866	0.767	0.568	0.896	0.778	0.728	0.897	0.898	0.728	1.000	0.807	0.684	0.915
广东	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.913	0.639	0.978	0.885	0.679	1.000	0.950	0.830	0.995
海南	0.916	0.717	1.000	1.000	1.000	1.000	0.798	0.359	0.908	0.887	0.766	0.924	0.900	0.711	0.958
东部地区均值	0.628	0.529	0.728	0.663	0.590	0.733	0.634	0.494	0.687	0.696	0.595	0.759	0.655	0.552	0.727
辽宁	0.238	0.201	0.405	0.300	0.231	0.336	0.346	0.410	0.342	0.377	0.245	0.499	0.315	0.272	0.396
吉林	0.652	0.326	1.000	0.623	0.246	1.000	0.647	0.386	0.929	0.668	0.366	1.000	0.648	0.331	0.982
黑龙江	0.694	0.416	1.000	0.736	0.512	0.996	0.754	0.469	0.913	0.824	0.774	0.970	0.752	0.543	0.970
东北部地区均值	0.528	0.314	0.802	0.553	0.330	0.777	0.582	0.422	0.728	0.623	0.462	0.823	0.572	0.382	0.783
山西	0.322	0.193	0.409	0.223	0.145	0.336	0.301	0.116	0.565	0.315	0.171	0.402	0.290	0.156	0.428
安徽	0.287	0.192	0.435	0.365	0.224	0.435	0.337	0.245	0.462	0.343	0.294	0.414	0.333	0.239	0.437
江西	0.210	0.137	0.583	0.301	0.280	0.525	0.324	0.311	0.350	0.353	0.210	0.525	0.297	0.235	0.496
河南	0.223	0.124	0.391	0.258	0.162	0.391	0.277	0.199	0.332	0.258	0.156	0.389	0.254	0.160	0.376
湖北	0.309	0.238	0.436	0.337	0.258	0.360	0.367	0.292	0.430	0.427	0.342	0.512	0.360	0.283	0.435
湖南	0.477	0.265	0.591	0.531	0.365	0.632	0.547	0.423	0.654	0.716	0.354	0.828	0.568	0.352	0.676
中部地区均值	0.305	0.192	0.474	0.336	0.239	0.447	0.359	0.264	0.466	0.402	0.255	0.512	0.351	0.238	0.475
内蒙古	0.324	0.281	0.381	0.592	0.316	0.834	0.575	0.375	0.734	0.528	0.292	0.765	0.505	0.316	0.679
广西	0.344	0.323	0.400	0.421	0.507	0.330	0.408	0.561	0.281	0.585	0.633	0.415	0.440	0.506	0.357
重庆	0.502	0.456	0.673	0.744	0.717	0.807	0.577	0.401	0.699	0.867	0.774	0.991	0.673	0.587	0.793
四川	0.307	0.149	0.377	0.381	0.231	0.466	0.309	0.212	0.385	0.361	0.302	0.478	0.340	0.224	0.427
贵州	0.335	0.272	0.505	0.388	0.242	0.471	0.433	0.352	0.534	0.586	0.453	0.753	0.436	0.330	0.566
云南	0.308	0.208	0.489	0.389	0.243	0.543	0.400	0.343	0.593	0.436	0.376	0.634	0.383	0.293	0.565
西藏	0.158	0.052	0.221	0.294	0.324	0.177	0.245	0.400	0.143	0.292	0.332	0.201	0.247	0.277	0.186
陕西	0.801	0.377	0.989	0.992	0.661	1.000	1.000	1.000	1.000	0.994	0.873	1.000	0.947	0.728	0.997
甘肃	0.267	0.136	0.365	0.321	0.222	0.339	0.214	0.207	0.333	0.337	0.276	0.404	0.285	0.210	0.360
青海	0.382	0.363	0.649	0.418	0.313	0.720	0.449	0.336	0.743	0.466	0.224	0.834	0.429	0.309	0.737

宁夏	0.245	0.123	0.324	0.292	0.206	0.473	0.338	0.276	0.425	0.475	0.320	0.623	0.338	0.231	0.461
新疆	0.599	0.266	0.873	0.751	0.502	1.000	0.816	0.517	1.000	0.936	0.849	1.000	0.776	0.534	0.968
西部地区均值	0.381	0.251	0.521	0.499	0.374	0.597	0.480	0.415	0.573	0.572	0.475	0.675	0.483	0.379	0.592
全国均值	0.460	0.335	0.606	0.525	0.413	0.629	0.516	0.412	0.604	0.584	0.470	0.685	0.521	0.408	0.631

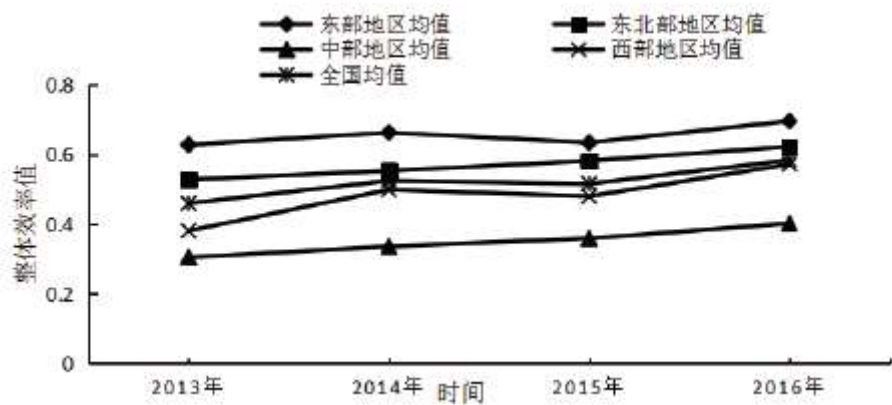


图 3 2013—2016 年绿色研发投入整体效率均值变化

由表 1 的各个年份中的第 2 列可知,中国各省份工业企业绿色研发中的技术开发效率明显处于低下水平,2013—2016 年的均值为 0.408。超过年均值的地区只有 12 个,不到总体的一半,说明我国整体的技术开发水平需要提高,也由此可以说明中国工业企业绿色研发整体效率低下的原因主要在于技术开发效率不足。在样本的考察期间内,技术开发的效率均值前 3 位分别是上海、广东和陕西,均值分别为 0.885、0.830、0.728。整体效率均值排名第三的上海,在技术开发阶段效率均值排名第一,这说明上海充分发挥了区位优势,在经济优势的推动下,科技研发氛围变得更加浓厚,也吸引了大量国内外人才投身于上海工业企业发展。但即便如此,上海的技术开发效率均值还没有达到相对最优的水平。

由图 4 所示,东部地区的技术开发效率一直保持在中国区域前位,其他区域在考察期内大多数都落在全国均值下方,说明除了东部地区之外的区域,在提高技术开发效率上,需要投入大量的资源 and 时间来调整、磨合。

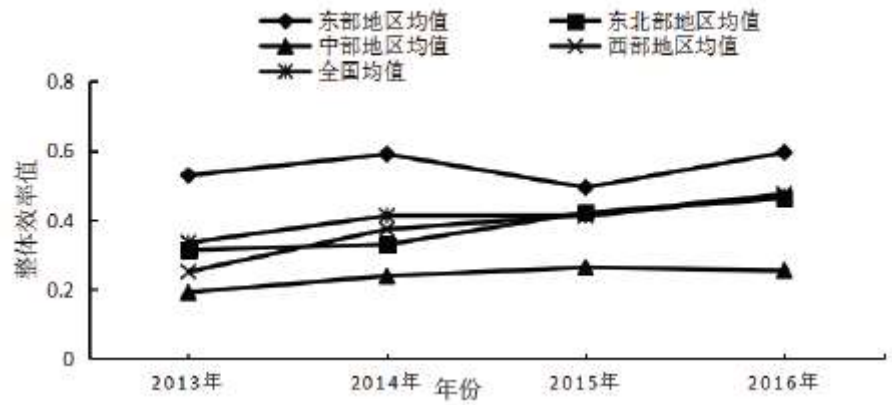


图 4 2013—2016 年技术开发效率均值变化

(3) 中国区域工业企业绿色研发投入第二阶段 (经济转化) 效率分析。

由表 1 的各个年份中的第 3 列可知, 在样本考察期内, 绝大部分地区的经济转化效率要高于技术开发效率。2013—2016 年全国均值为 0.631, 可见中国工业企业的绿色研发投入效率整体水平主要靠着经济转化来提升, 经济转化是绿色研发整个过程的关键阶段。从单个地区来看, 经济转化均值高于 0.95 的地区有 7 个, 分别是上海、广东、海南、吉林、黑龙江、陕西和新疆。上海和广东位于中国高新技术产业的聚集区, 有利于经济转化和专利成果转化。在区域制度扶持下, 上海和广东在绿色技术研发和绿色成果转化方面保持着较高的水平。海南和陕西在国家政策管控下, 注重工业企业发展绿色生态意识, 使得污染物排放量比较低。吉林、黑龙江和新疆等地在绿色研发投入不高的前提下, 绿色成果利用率和经济产出能保持较高的水平。

由图 5 来看, 中国东部地区和东北部地区的经济转化明显高于全国均值水平, 东北部地区表现尤为突出。中部和西部地区的效率水平始终低于全国水平, 所以要提高全国的绿色研发效率水平, 需要大力改善中部和西部地区的研发投入两个阶段的效率水平。

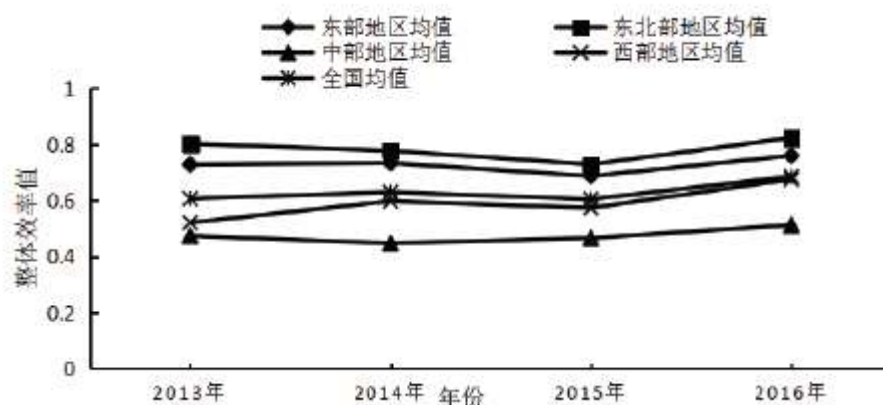


图 5 2013—2016 年经济转化效率均值变化

(4) 区域工业企业绿色研发投入效率模式分类。

根据表 1 的均值结果, 将 31 个省份的绿色研发效率分为四种情况, 如图 6 所示, 将两个阶段的全国均值作为分界点, 设技术开发效率和经济转化效率为横坐标和纵坐标, 进而将中国各省份工业企业绿色研发效率分为四种类型, 分别是“高开发、高转化”“高开发、低转化”“低开发、高转化”“低开发、低转化”。

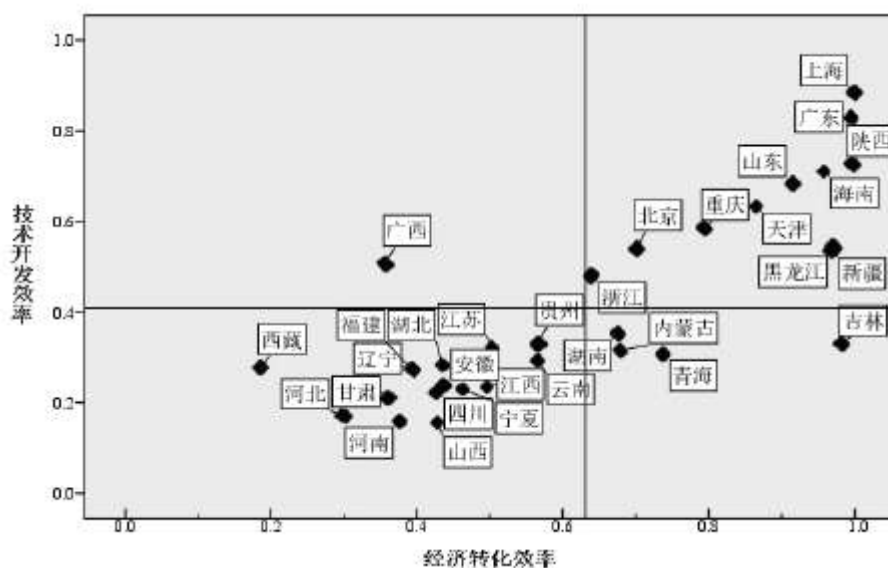


图 6 2013—2016 年两阶段效率均值二维分类情况

在样本考察期间,大部分样本落在“高开发、高转化”和“低开发、低转化”两种类型之中,因此主要分析这两种类型。上海、广东等 11 个地区的工业企业绿色研发效率属于“高开发、高转化”,占全国省份的 35.5%。这些地区的技术开发和经济转化效率能保持相对高的水平,能充分发挥各个地区的资源环境和地理优势,能够实现技术开发和经济转化的协调发展。贵州、云南等 15 个地区的工业企业绿色研发效率属于“低开发、低转化”。占 31 个省份的比例为 48.4%,近半数的省份在技术开发和经济转化过程中的效率是相对无效的。该类型的地区不管在技术开发阶段还是经济转化阶段都有很大的提升空间,也需要花更多的成本来改善绿色研发投入的效率水平,这样才能有助于工业企业的绿色可持续发展。

3 结论与建议

3.1 结论

本文拓展传统的两阶段 DEA 模型,通过构建共享投入/产出和中间产出的两阶段 DEA 模型,将绿色研发投入分为技术开发和经济转化两个阶段。以中国 31 个省份的工业企业为对象,研究各个省份工业企业的绿色研发投入效率并分解效率。研究结果表明:(1)工业企业绿色研发投入整体效率水平偏低,没有一个省份在效率上达到最优。从区域来看,整体绿色研发投入效率差异明显,东部地区的整体效率水平明显高于其他地区,中部地区的整体效率水平最低。(2)经济转化的效率均值明显高于技术开发的效率均值,且存在 DEA 有效的省份,全国经济转化均值效率水平中等偏上。区域上,东北部和东部地区均值都高于全国均值水平,中部地区效率水平最低。(3)技术的整体效率均值水平偏低,全国均值仅为 0.408,较低的技术开发水平是导致各个省份工业企业绿色研发整体效率偏低的主要原因。

3.2 建议

基于以上结论,针对中国区域工业企业在绿色研发投入面临的问题,提出以下几点建议:

第一,调整研发投入资源在两个子阶段过程的投入比例和结构,优化创新资源配置,保证技术开发和经济转化的和谐有序发展,促进绿色研发投入整体效率的提升。对于技术开发效率低的地区,应调整研发投入资源在技术开发过程中的配置比,加强人才

引进和政府扶持,同时应创造良好的研发环境,鼓励多阶段创新,加大研发产出。对于经济转化效率水平低的地区,应加快完善经济成果转化平台建设,推进各个地区的产学研发展,促进经济成果转化。

第二,优化研发投入资源的区域分配,注重市场调节分配和宏观经济调控。区域经济的不协调发展,是导致区域工业企业绿色研发投入效率不协调发展的主要原因。应重点发展研发投入效率水平低的中部和西部地区,建立长久稳定的合作关系,人才和政策方面给予倾斜性照顾,让东部的发达地区带动中西部落后地区,推进建设更加有效的区域协调发展机制。

第三,营造公平公正的绿色研发环境,加强知识产权保护力度,提高全国工业企业对绿色研发投入技术价值的重视意识。同时,市场对研发资源起到基础性作用,让市场公平决定绿色研发项目,减少行政垄断,避免行业内的恶性竞争,促进绿色研发成果与海内外市场需求的紧密结合。

第四,稳步加强政府的环境规制、社会环保监督力度,鼓励工业企业使用清洁生产设备和实现绿色技术创新,特别是那些高污染、高能耗的工业企业,同时应避免在这些类型的工业企业中投入过多的资源。严格落实各个区域工业企业污染物的排放许可和总量,建立环境损害惩罚机制,必要时,政府可以对绿色研发困难的工业企业给予政策支持和资金援助。

参考文献:

- [1]Chen Y S,Lai S B,Wen C T.The influence of green innovation performance on corporate advantage in Taiwan[J]. Journal of Business Ethics,2006,67(4):331-339.
- [2]高芳,李羽桐.研发投入与企业技术创新的关系研究[J]. 经济管理(文摘版),2017(6):405-406.
- [3]Charnes A,Cooper W W,Rhodes E.Measuring the efficiency of decision making units[J].European Journal of Operational Research,1978(2):429-444.
- [4]陈恒,陈伟.基于 DEA 的中外跨国公司研发效率比较分析[J]. 科技进步与对策,2006(8):7-9.
- [5]谢伟,胡玮,夏绍模.中国高新技术产业研发效率及其影响因素分析[J]. 科学学与科学技术管理,2008(3):144-149.
- [6]肖静,程如烟,姜桂兴.基于超效率 DEA 方法的研发效率国际比较研究[J]. 情报杂志,2009(6):89-92,172.
- [7]赵聚辉,黄诗华.基于超效率 DEA 和 Malmquist 指数的中国科技研发效率评价研究[J]. 宏观经济研究,2019(9):123-129.
- [8]王博,冯锋,安庆贤,等.区域高技术产业 R&D 活动效率分析与评价——基于一种新型改进两阶段网络 DEA 模型[J]. 科技管理研究,2014(5):58-64.
- [9]孙丝雨,安增龙.两阶段视角下国有工业企业绿色技术创新效率评价——基于网络 EBM 模型的分析[J]. 财会月刊(中),2016(12):20-25.
- [10]Aigner D J,Lovell C K,Schmidt P.Formulation and estimation of stochastic frontier production function models[J]. Journal of Econometrics,1977,6(1):21-37.
- [11]陈修德,梁彤纁.中国高新技术产业研发效率及其影响因素——基于面板数据 SFPF 模型的实证研究[J]. 科学学研

究, 2010(8):1198-1205.

[12]王成东. 区域产业融合与产业研发效率提升——基于 SFA 和中国 30 省市的实证研究[J]. 中国软科学, 2017(10):94-103.

[13]冯海波, 葛小南. 中国地方政府 R&D 投入效率及影响因素分析——基于三阶段 DEA-Malmquist 指数法[J]. 系统工程, 2019(1):1-13.

[14]岳意定, 刘贯春, 杨立. 同时考虑环境因素和统计噪声的四阶段 SFA 模型——在我国省际技术效率和政府管理绩效中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2014(9):2283-2294.

[15]Bian Y W, Hu M, Xu H. Measuring efficiencies of parallel systems with shared inputs/outputs using data envelopment analysis[J]. Kybernetes, 2015, 44(3):336-352.

[16]冯志军, 陈伟. 中国高技术产业研发创新效率研究——基于资源约束型两阶段 DEA 模型的新视角[J]. 系统工程理论与实践, 2014(5):1202-1212.

[17]冯志军. 中国工业企业绿色创新效率研究[J]. 中国科技论坛, 2013(2):82-88.

[18]Noailly J, Ryfisch D. Multinational firms and the internationalization of green R&D: A review of the evidence and policy implications[J]. Energy Policy, 2015, 83(3):218-228.

[19]Stucki T, Woerter M. Competitive pressure and diversification into green R&D[J]. Review of Industrial Organization, 2019, 55(2):301-325.

[20]余泳泽, 刘大勇. 我国区域创新效率的空间外溢效应与价值链外溢效应——创新价值链视角下的多维空间面板模型研究[J]. 管理世界, 2013(7):6-20.

[21]Griliches Z. Patent statistics as economic indicators: A survey[J]. Journal of Economic Literature, 1990, 28(4):1661-1707.

[22]陈倩倩, 陈业华, 李风燕. 基于共享投入 DEA 模型的我国区域创新效率预测[J]. 统计与决策, 2019(14):37-41.

[23]陈凯华, 官建成. 共享投入型关联两阶段生产系统的网络 DEA 效率测度与分解[J]. 系统工程理论与实践, 2011(7):1211-1221.

[24]熊曦, 关忠诚, 杨国梁, 等. 嵌套并联结构两阶段 DEA 下科技创新效率测度与分解[J]. 中国管理科学, 2019(3):206-216.

[25]Kao C, Hwang S N. Efficiency decomposition in two-stage data envelopment analysis: An application to non-life insurance companies in Taiwan[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 185(1):418-429.