

# 中国区域可持续创新效率影响因素

陈强, 徐凯

(同济大学 经济与管理学院, 上海 200092)

**摘要:** 采用基于非期望产出的数据包络分析法(DEA), 评估了中国 30 个省级行政区的可持续创新效率, 进而通过 Tobit 回归研究了中国区域可持续创新效率的影响因素。结果表明: 中国区域可持续创新效率整体偏低, 但呈现缓慢上升的趋势; 区域间的效率值差异较大, 东部地区明显高于中部和西部地区; 各因素对中国东中西部地区可持续创新效率影响的显著性差异较大, 体现了不同区域创新系统的异质性。

**关键词:** 区域可持续创新效率; 能源和环境约束; 非期望产出; 影响因素

中图分类号: F127

文献标志码: A

## Influencing Factors of Regional Sustainable Innovation Efficiency in China

CHEN Qiang, XU Kai

(School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The data envelopment analysis (DEA) based on undesirable outputs was used to evaluate the sustainable innovation efficiency of 30 provinces in China, and the factors affecting the sustainable innovation efficiency in China were studied through Tobit regression. The results indicate that the sustainable innovation efficiency in China is low but rise gradually. In addition, efficiency values vary widely among regions. The efficiency value of eastern China is higher than that of central and western China. The significance of factors affecting the sustainable innovation efficiency of eastern, central and western China is quite different, reflecting the heterogeneity of regional innovation systems in different regions.

**Key words:** regional sustainable innovation efficiency; energy and environmental constraints; undesirable outputs; influencing factors

技术创新是全球化进程和知识经济新时代的本质要求, 已经成为促进国家和地区经济社会可持续发展的关键动力因素。技术创新能力是推动区域发展和企业进步的主要动力, 深刻地改变了区域经济与产业格局。伴随着人口红利的消失, 中国经济发展进入新常态, 经济发展也由高速转变为中高速增长。目前, 中国的创新发展很大程度上依靠政府和企业对研发活动的大量投入, 创新效率不高。盲目地增加投入不能解决创新活动实质性问题, 更需要关注科技资源投入效率, 因此提高区域创新效率迫在眉睫。中国经济快速增长的背后依赖高消耗、高污染的经济发展模式, 消耗了大量的石油、煤炭等能源, 引发了日益严峻的资源环境问题<sup>[1]</sup>。在企业的创新活动中, 特别是生产过程中, 不可避免地产生各种工业污染物等非期望产出, 给自然环境带来巨大的危害。可持续创新是实现经济、资源、环境效益协同发展的有效途径, 通过较低的创新投入获得较高的创新产出, 实现资源利用最优化、能源消耗和环境污染最小化, 推动经济的可持续增长。企业可持续发展的目标在于低投入、高产出、低能耗、少污染, 中国经济发展需要注重可持续创新效率的提高。此外, 中国的区域经济与科技创新发展不协调、不平衡和分化的趋势比较明显。各区域的经济、社会环境不同, 技术水平、产业结构、劳动力素质、政府和金融机构支持各异, 导致创新效率的区域差异普遍存在, 研究中国的区域可持续创新效率及其影响因素显得尤为重要。

## 1 相关研究述评

创新效率是创新资源投入和产出之间的比例。“区域创新效率”是指在给定的投入水平下实现最大产出、或者既定产出水平下实现最小投入的能力。

收稿日期: 2021-07-10

第一作者: 陈强(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 管理学博士, 主要研究方向为管理理论与工业工程、技术与创新管理。E-mail: chenqiang@tongji.edu.cn

通信作者: 徐凯(1988—), 男, 管理学博士, 主要研究方向为技术与创新管理。E-mail: njuxk1988@163.com



论文  
拓展  
介绍

创新效率体现了创新投入与产出之间的转换关系,反映了创新资源的配置情况。提高创新效率是指在创新投入不变的情况下提高产出水平,或者保持创新产出不变的前提下降低创新要素的投入。一般来说,可持续创新侧重考察创新的非期望产出,强调创新的可持续性,其目的是减少经济活动过程对环境的不利影响<sup>[2]</sup>。可持续创新是指创新全过程、各阶段都遵循可持续发展理念,旨在提升经济效益的同时降低对能源的依赖,减少对环境的影响,促进环境和经济可持续发展。可持续创新的目标在于通过减轻对自然资源的过度依赖、减少对环境的破坏以及降低化石能源的使用等方式来提高可持续创新的效率。环境可持续性创新问题得到了越来越多的关注,如何平衡技术创新、经济增长与环境可持续性目标变得越来越重要。如今,随着普遍对工业污染物排放和全球变暖的重视,在中国的创新效率评估研究中有必要考虑诸如温室气体和工业污染物等非期望产出。“可持续创新效率”是指考虑了能源消耗与环境约束后的区域创新效率。具体来说,本研究中“可持续创新效率”是指能源、环境约束下,基于二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、二氧化硫(SO<sub>2</sub>)等非期望产出的区域创新资源的投入产出效率。

近年来,一些学者关注到可持续创新效率问题,通过不同的指标与方法对中国的可持续创新效率进行了研究。罗良文等<sup>[3]</sup>考虑了环境效应方面的非期望产出,评估了各区域绿色创新效率,结果表明中国整体绿色创新效率较低,中部和西部地区的效率值有很大的上升空间,区域间效率值差距呈扩大的趋势。钱丽等<sup>[4]</sup>将工业污染物作为创新的非期望产出,评估了中国工业企业绿色创新效率,发现绿色研发效率较低。陈景新等<sup>[5]</sup>将工业三废作为非期望产出指标评估了中国的区域绿色创新效率。结果表明,中国整体的绿色创新效率呈上升趋势,但是仍然较低。东中西部地区的效率差异较大,而且各因素对东中西部地区效率的影响不同。李晓阳等<sup>[6]</sup>的研究也发现,中国整体的绿色创新效率较低,东中西部地区间差异较大,环境规制未能起到促进创新效率提升的作用。沈能等<sup>[7]</sup>的研究发现,地区间绿色创新效率的差距在扩大,各因素对于东中西部地区效率的影响不同。Liu等<sup>[8]</sup>考虑了“环境污染”和“创新失败”等创新的非期望产出,计算了中国高科技产业集群的绿色创新效率,发现每个区域中影响高科技产业绿色创新效率的因素并不相同。李文鸿等<sup>[9]</sup>的研究发现,我国各区域绿色创新效率呈不同的上升

趋势,环境规制对绿色创新效率有显著的正向影响。吕承超等<sup>[10]</sup>的研究表明,我国的绿色创新效率得到提升,但各区域之间发展仍然不均衡,区域间差距呈现先下降后上升又下降的趋势。赵路等<sup>[11]</sup>计算了区域绿色技术创新效率,并分析了不同类型的环境规制对绿色技术创新效率的影响,发现不同区域环境规制的溢出效应并不相同。

迄今为止,对于同时考虑能源及环境约束下的可持续创新效率研究还相对不足,可持续创新与创新效率之间的关系尚不明确。现有关于创新效率的研究虽然涵盖了投入与产出方面的各个指标,具体的评价指标也不尽相同,但是大多未能同时考虑能源消耗与环境约束,导致效率评定结果不能真实地反映中国的创新表现。创新效率评定方法比较落后,现有关于创新效率评定的研究无论是数据包络分析法(DEA)还是随机前沿分析法,大多使用传统的计量模型,没有考虑变量的松弛性,难以处理非期望产出等问题。随着数据包络分析法的发展,近年来一些新的模型如SBM(slack-base measure)模型、超效率SBM模型等被提出,并被应用于能源、经济、环境等效率评价研究中,但是在创新效率研究中还未普及。此外,对于创新效率影响因素的研究还不够全面,未能考虑环境规制因素对可持续创新效率的影响。环境问题日益严峻,环境规制对于创新的影响越来越明显,已经成为不能忽视的重要因素。为弥补这些研究空白,将能源消耗与环境约束纳入考量,构建了基于非期望产出的DEA-SBM模型,对中国的区域可持续创新效率进行评定,在此基础上,全面分析了创新效率的影响因素。

## 2 区域可持续创新效率评定

### 2.1 研究方法

数据包络分析法作为非参数分析法的典型代表,已经被广泛应用于能源、环境、生态、技术创新等效率评定研究。数据包络分析法考虑了最优的投入和产出比例,可以比较客观地反映评价对象本身的特点,在处理复杂系统多投入、多产出问题方面具有绝对的优势。数据包络分析法成为目前用于多投入、多产出模式下决策单元相对有效性和规模收益评价最广泛的方法之一。传统的数据包络分析法都是基于角度和径向的度量,依靠经典的距离函数或者方向性距离函数来计算相对效率,无法处理好非期望产出问题。基于非径向、非角度的SBM模型将

松弛变量引入目标函数中,解决了投入变量松弛性问题,完善了非期望产出的效率测算方法。SBM模型避免了传统数据包络分析模型中由于径向和角度选取而造成的误差,更能体现效率测算的本质。本研究采用DEA-SBM模型,将非期望产出纳入评价体系,建立的模型如下所示:

$$\min \theta^* = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n (s_i^- / x_{i0})}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} \left( \sum_{r=1}^{s_1} (s_r^g / y_{r0}^g) + \sum_{r=1}^{s_2} (s_r^b / y_{r0}^b) \right)}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} x_0 = X\lambda + s^- \\ y_0^g = y^g\lambda - s^g \\ y_0^b = y^b\lambda + s^b \\ \lambda, s^-, s^g, s^b \geq 0 \end{cases}$$

式中: $x$ 为投入变量; $y$ 为产出变量; $\theta^*$ 为决策单元效率; $s^-$ , $s^g$ , $s^b$ 分别为投入、期望产出以及非期望产出指标中的松弛变量; $\lambda$ 为权重。该模型假定有 $n$ 个决策单元,每个都具有 $m$ 个输入和 $s$ 个输出。对于每个决策单元而言,当 $\theta^*=1$ 且 $s^- = s^g = s^b = 0$ 时,它的效率是最优的。当 $\theta^* < 1$ 时,决策单元不是处于最优效率,表示投入、产出中有可以提升的空间。

## 2.2 指标选取及数据处理

数据包络分析模型中评价指标的选取会影响评价结果的有效性,采用不同的指标往往会得到不同的结果。技术创新活动高度依赖研发投入,研发投入居于科技创新的核心位置,是影响创新能力的关键因素。学者们对创新投入指标的选择主要包括两部分:研发人员投入与研发经费支出。创新活动的期望产出有很多,学者们通常采用专利和新产品销售收入等指标衡量创新成果。专利反映了技术的原创性,能够代表创新过程中新知识、新技术。新产品是技术创新成果的重要表现形式,也是技术转化阶段的主要产出,具有较高的技术含量和市场前景。本研究对区域可持续创新效率评价模型中的投入与产出指标进行了筛选,选取研发人员全时当量、研发经费内部支出作为投入指标,选取发明专利申请数和新产品销售收入作为期望产出的指标。此外,创新活动过程中不可避免地伴随着一些非期望产出的产生,如工业污染物、能源消耗产生的 $\text{CO}_2$ 等。国内外学者们关注的重点不同,选取的非期望产出指标也不尽相同。参考其他学者关于创新非期望产出指标的选取,基于能源消耗与环境约束的考量,并考虑到非期望产出的危害性及指标数据可得性,本研究选取工业 $\text{SO}_2$ 排放量<sup>[12]</sup>与 $\text{CO}_2$ 排放量<sup>[13]</sup>作为非期望

产出的指标。

中国大陆地区包含了31个省、直辖市和自治区。按照传统的研究方法,将这31个省级行政区划分为东部、中部和西部三大地区。东部地区包括北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、海南等11个省级行政区,中部地区包括山西、吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北、湖南等8个省级行政区;西部地区包括内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆、西藏等12个省级行政区。由于西藏自治区的部分统计数据资料缺失,考虑到数据的可获得性和指标的可比性,本研究未涵盖西藏自治区,即本研究中所指的“西部地区”只有11个省级行政区。原始数据来源于《中国能源统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国科技统计年鉴》《中国统计年鉴》等。各指标的描述性统计如表1所示。

表1 描述性统计

Tab.1 Descriptive statistics

变量	单位	平均值	标准差	最小值	最大值
研发人员全时当量	万人	7.05	9.36	0.06	45.19
研发经费内部支出	亿元	738.97	1020.77	2.05	5841.53
专利申请数	万件	1.55	2.45	0.01	14.54
新产品销售收入	万亿元	0.38	0.51	0.00	2.87
$\text{SO}_2$ 排放量	万吨	66.79	40.76	1.70	182.74
$\text{CO}_2$ 排放量	亿吨	4.01	2.82	0.32	13.23

## 2.3 区域可持续创新效率评定结果分析

通过DEA-SBM模型计算得到了中国30个省级行政区2008年—2016年的区域可持续创新效率,结果如表2所示。数值越大,说明可持续创新效率越高。数值为1表示其效率处于效率前沿面上。

2008年—2016年,只有6个省级行政区的可持续创新效率始终为1.0000,包括北京、上海、浙江、广东、海南、重庆。除了重庆位于西部地区外,其余5个省级行政区都位于东部地区。这些省级行政区大多经济发达,技术创新水平较高,重视环境保护。海南省的创新效率也是1.0000,这和海南省的环境保护和政策规制密切相关。5个省级行政区的平均效率值介于0.8000~1.0000之间,包括安徽、江苏、湖南、天津、吉林。这些省级行政区大多位于东部和中部地区,安徽、江苏的经济较为发达,高等院校和科研机构数量很多,科技创新水平较高,湖南、天津、吉林等省级行政区受到政府协调发展战略和环境保护政策的影响明显。15个省级行政区的平均效率值介于0.3000~0.8000之间,包括山东、青海、福建、广西、湖北、新疆、四川、贵州、云南、宁夏、江西、辽宁、

表2 中国区域可持续创新效率  
Tab.2 Regional sustainable innovation efficiency in China

省级行政区	各年份区域可持续创新效率									均值
	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	
北京	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
天津	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.811 8	1.000 0	1.000 0	0.820 2	0.820 8	0.734 3	0.909 7
河北	0.279 7	0.238 1	0.271 3	0.271 4	0.410 0	0.418 4	0.388 4	0.304 9	0.340 1	0.324 7
辽宁	0.295 6	0.318 4	0.365 7	0.337 0	0.430 8	0.496 6	0.441 7	0.324 7	0.346 8	0.373 0
上海	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
江苏	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.777 4	0.975 3
浙江	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
福建	0.518 0	0.546 5	0.609 9	0.597 2	0.564 4	0.525 5	0.503 3	0.514 2	0.557 1	0.548 5
山东	0.471 2	1.000 0	1.000 0	0.647 4	1.000 0	1.000 0	0.599 9	0.511 4	0.508 8	0.748 7
广东	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
海南	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
山西	0.165 4	0.150 1	0.173 2	0.185 9	0.255 1	0.278 8	0.235 0	0.194 7	0.236 6	0.208 3
吉林	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.304 6	0.512 5	0.403 4	1.000 0	0.802 3
黑龙江	0.137 4	0.152 7	0.155 8	0.144 5	0.180 0	0.190 7	0.183 8	0.191 5	0.184 4	0.169 0
安徽	0.468 6	0.621 2	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.898 9
江西	0.238 8	0.182 1	0.222 1	0.246 6	0.449 3	0.528 7	0.545 2	0.485 0	0.725 9	0.402 6
河南	0.340 5	0.331 8	0.329 6	0.290 7	0.319 4	0.465 7	0.451 7	0.399 6	0.413 8	0.371 4
湖北	0.513 5	0.474 7	0.502 5	0.435 3	0.575 0	0.618 7	0.615 3	0.554 1	0.619 8	0.545 4
湖南	0.490 3	0.612 1	0.725 8	0.724 2	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.839 2
内蒙古	0.202 6	0.202 0	0.184 2	0.171 8	0.220 9	0.208 5	0.186 3	0.179 6	0.196 5	0.194 7
广西	0.492 7	0.400 6	0.417 8	0.441 8	0.588 0	0.732 2	0.548 4	0.567 8	0.728 5	0.546 4
重庆	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
四川	0.459 8	0.417 4	0.423 0	0.404 2	0.574 5	0.581 6	0.589 5	0.628 5	0.544 0	0.513 6
贵州	0.396 5	0.419 0	0.442 0	0.425 6	0.431 0	0.402 5	0.458 9	0.434 3	0.454 9	0.429 4
云南	0.363 5	0.402 7	0.410 6	0.378 1	0.443 1	0.432 5	0.458 0	0.431 1	0.462 2	0.420 2
陕西	0.227 3	0.281 9	0.313 5	0.302 8	0.285 3	0.286 6	0.264 1	0.254 0	0.253 2	0.274 3
甘肃	0.248 1	0.185 4	0.248 1	0.320 4	0.484 8	0.495 0	0.498 5	0.392 1	0.329 3	0.355 7
青海	0.290 5	0.345 7	0.291 9	0.128 2	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.672 9
宁夏	0.178 9	0.233 8	0.270 5	0.307 3	0.466 1	0.562 8	0.470 7	0.624 4	0.567 6	0.409 1
新疆	0.240 5	0.308 9	0.373 2	0.376 3	0.471 5	1.000 0	1.000 0	0.533 7	0.533 5	0.537 5
东部	0.778 6	0.827 5	0.840 6	0.787 7	0.855 0	0.858 2	0.795 8	0.770 5	0.751 3	0.807 3
中部	0.419 3	0.440 6	0.513 6	0.503 4	0.597 4	0.548 4	0.567 9	0.528 5	0.647 6	0.529 6
西部	0.372 8	0.381 6	0.397 7	0.387 0	0.542 3	0.609 3	0.588 6	0.549 6	0.551 8	0.486 7
全国	0.534 0	0.560 8	0.591 0	0.564 9	0.671 6	0.684 3	0.659 0	0.625 0	0.650 5	0.615 7

河南、甘肃、河北。这些省级行政区大多位于经济发展相对落后的中西部地区,正在经历城市化和工业化进程。同时,这些省级行政区的经济不发达,教育资源不足,技术创新水平较低,制约了创新效率的提升。值得注意的是,4个省级行政区的创新效率平均值低于0.300 0,包括陕西、山西、内蒙古、黑龙江。陕西和山西主要生产煤炭,内蒙古出产丰富的矿产资源,黑龙江是中国的石油生产大省和重工业基地。这4个省级行政区都是中国传统的资源生产和化石能源消耗地区,资源密集型产业比重较大,缺乏高校和创新型企业,技术创新水平比较落后。这些省级行政区依赖大量的资源投入,往往采取以煤炭开采、钢铁和水泥生产为主的重工业导向的经济发展模式,带来了严重的环境问题。

大部分省级行政区的可持续创新效率值在2008

年—2016年呈现出上升的趋势。少数省级行政区的效率值出现波动,甚至下降,如天津、江苏、山东、新疆等。通过进一步分析发现,近年来这些省级行政区的创新资源投入大幅增长,特别是2013年以来研发经费支出增长较快,但是相应的创新产出增长不明显,甚至专利申请数等出现下滑,导致创新效率下降,这说明这些省级行政区创新资源的投入并未实现较好的产出。

进一步将30个省级行政区按照东中西部地区进行归类,结果如图1所示。从图1可以看出,全国整体的可持续创新效率呈现缓慢上升的趋势,从2008年的0.534 0增长到2016年的0.650 5,平均值为0.615 7。这表明中国在创新投入、环境保护和节能减排方面的持续努力已经取得成效,可持续创新效率有所提升。然而,目前中国可持续创新效率仍然偏低,还有较大上

升空间。通过计算结果可以看出,经济发达的东部地区的可持续创新效率较高,而经济欠发达的中西部地区的可持续创新效率较低。东部地区的创新效率始终高于中部和西部地区,其平均创新效率为0.8073。东部地区的创新效率在2008年—2013年缓慢增长,而在2013年—2016年又缓慢降低。近年来,东部地区的研发投入增长较快,但是创新产出增长缓慢,导致了创新效率的下降。中部和西部地区的创新效率始终比较相

似,呈现缓慢的增长趋势,创新效率平均值分别为0.5296和0.4867。与全国的可持续创新效率相比,东部地区的创新效率远高于全国水平,中部和西部地区的创新效率则低得多。从图1可以清楚地看出,东部地区是推动中国技术创新发展的主要力量,中部和西部地区技术创新相对落后。东部地区创新投入的快速增长并未带来创新效率的持续提升,区域创新资源的配置依然值得关注。

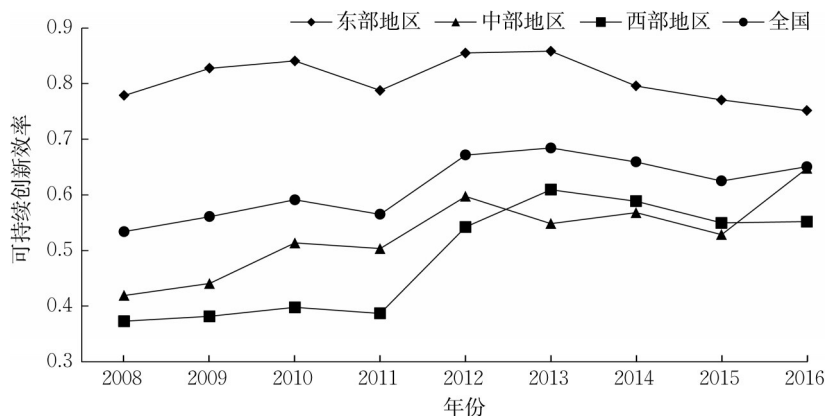


图1 区域可持续创新效率

Fig.1 Regional sustainable innovation efficiency

### 3 区域可持续创新效率影响因素分析

#### 3.1 变量选取

创新效率的影响因素有很多。创新的产生和扩散依赖于区域的经济、社会、制度等环境。区域创新效率受到外部环境和资源要素的综合影响,如区域经济社会发展水平、市场开放程度、知识产生与流动等多方面因素。创新环境在创新资源投入转化过程中的调节作用直接决定了区域创新系统的效率。良好的创新环境有助于创新活动的顺利进行,提高创新活动的效率。在梳理学者们研究成果<sup>[14-15]</sup>的基础上,基于创新活动的特点,考虑了相关因素的重要性及数据可得性,从创新基础、创新主体间的联系、区域开放程度、微观创新环境和环境规制等方面考察各因素对区域可持续创新效率的影响。

##### 3.1.1 创新基础

创新基础包含的因素较多,本研究考虑了政府经费支持力度、人力资源水平、公共教育支出、政府科技投入、技术市场成熟度等创新基础因素的影响。

(1)政府经费支持力度。政府作为参与创新活动的主体,在区域创新系统中的地位举足轻重。政府通过提供企业的研发资金支持,直接参与到企业

的创新活动中,对企业的技术创新产生积极影响。政府资助研发经费能够规范企业的创新活动,降低企业研发的成本和风险,提高企业研发的积极性,促进创新活动的产出。本研究使用政府资金占企业研发费用内部支出比例来代表政府经费支持力度(Government)。

(2)人力资源水平。人是创新活动的主要实施者,贯穿整个创新活动的始终。人力资源水平体现了企业员工的能力和素质,决定了创新活动能否顺利进行。人力资源具有很强的主观能动性,对于知识的产生与扩散至关重要。人力资源水平较高时,员工的专业技能直接转换为生产力,促进了企业经济产出。同时,人力资源的知识外溢也带动了员工群体水平的提高,创造了良好的创新环境,有助于提高创新效率。区域创新活动需要的各种高素质的人力资源受到当地教育水平的直接影响。本研究采用在校大学生人数占年末人口总人数的比例来代表人力资源水平(Student)。

(3)公共教育投入。公共教育投入指政府财政支出中的教育经费。公共教育支出为社会发展提供了知识基础,促进了技术创新和劳动生产率的提高,带动了社会生产发展和经济增长。本研究使用公共

教育经费支出占区域GDP的比例代表公共教育投入水平(Education)。

(4)政府科技投入水平。“科技是第一生产力”。充足的科技投入,可以促进科技创新,进而拉动一个地区的经济增长。改革开放以来,中国政府科技投入持续稳定增长,各级政府也都加大了对科技创新的资金支持。本研究使用政府科技经费投入占区域GDP的比例代表政府科技投入水平(Technology)。

(5)技术市场成熟度。创新成果的转移、转化离不开技术市场。技术市场成熟度反映了技术市场的专业化程度。完善的技术市场有助于专利等创新成果的转化,刺激企业加速创新活动。一方面,企业在技术交易过程中获得收益,用以补充研发资金;另一方面,企业从技术市场中获得反馈信息以及时调整创新活动方向,有利于高价值持续成果的产生<sup>[16]</sup>。本研究使用技术市场成交额占区域GDP的比例代表技术市场成熟度(Market)。

### 3.1.2 创新主体间的联系

区域创新网络各主体间的密切联系对于促进创新资源的流动、提高创新活动的效率至关重要。本研究着重考虑了企业和科研机构之间的联系、产业结构等因素对创新效率的影响。

(1)企业和科研机构之间的联系。区域创新系统内各主体通过各种正式或非正式的联系促进了知识的流动和信息共享,并与区域环境相互作用,综合影响区域的创新表现。创新网络内各主体的联系越多,越容易实现创新资源的合理配置,提高创新系统的效率。企业与高等学校、科研机构等的相互合作,是推动区域创新发展的重要环节。本研究选取科研机构研发经费中企业资金占比代表企业和科研机构之间的联系(Link)。

(2)产业结构。企业是技术商业化的核心,处于区域创新网络的主体地位。分属不同产业的企业,其创新能力有较大差别。区域的产业结构直接影响区域创新系统的创新能力。本研究选取第二产业产值占区域GDP的比例代表区域的产业结构状况(Industry)。

### 3.1.3 区域开放程度

知识、技术由区域内的创新主体产生,并影响区域周围其他创新主体的创新过程,即所谓的“溢出”现象。区域的开放程度对技术的溢出与扩散至关重要,进而影响区域创新能力。本研究着重考虑了外商直接投资与进出口水平等因素的影响。

(1)外商直接投资水平。外商直接投资能够在一定程度上弥补中国科技创新资源的相对不足,直

接影响区域可持续创新的水平。外商直接投资不仅带来了先进的技术和工艺,还引入了高效的企业经营管理方式,营造了有利于创新的环境氛围。外资企业的人力资本流动、产业关联等对区域创新有着正向的溢出效应。外商投资加剧了区域内企业的市场竞争,迫使企业加大创新力度、不断提高创新效率以增强自身竞争力。本研究采用外商投资总额占区域GDP的比例代表外商直接投资水平(FDI)。

(2)进出口水平。国际贸易是经济开放的主要渠道,反映了国际市场需求,为企业进行产品和工艺创新制造了机会。企业进行国际贸易,能够不断地学习和模仿先进的技术知识,从而提高本国内的资源配置效率和创新效率。进出口总额代表区域对外贸易的规模水平,可以反映区域的对外开放程度。本研究采用区域进出口总额占区域GDP的比例代表区域的进出口水平(Import)。

### 3.1.4 微观创新环境

区域的微观创新环境是技术创新产生的必要保障。本研究重点考虑了交通基础设施水平因素的影响。完善的基础设施有助于优化空间分布,保障经济活动的进行。交通基础设施不仅影响本区域内的经济活动,还能够影响周边区域的经济活动。交通基础设施通过创新的溢出效应和市场规模效应作用于区域内企业的创新活动。本研究采用区域内高速公路里程除以土地面积代表交通基础设施水平(Infrastructure)。

### 3.1.5 环境规制

随着中国环境问题的日益严峻,环境规制作为解决环境问题的有效手段受到越来越多的重视。环境规制政策是可持续发展战略的具体化,是实现可持续发展的定向管理手段。政府环境规制的类型包括命令控制型、市场激励型、公众自愿型等。政府通过制定相关政策以规范企业活动,通过需求诱导的方式刺激技术创新活动。同时,促使企业降低污染排放和能源消耗,减少非期望产出,实现企业的可持续发展,提升可持续创新效率。环境规制对于污染密集型行业的可持续创新效率的影响尤其明显。环境规制的外部压力迫使企业不断进行技术升级,提高创新能力和可持续创新效率<sup>[17]</sup>。环境规制影响了技术创新过程中制度环境的不确定性,改变了资源配置,为技术创新创造了前提条件。政府的环境规制强度对于可持续创新效率有着至关重要的影响。环境规制是一把双刃剑,适当的环境规制有助于企业规范运行,降低盲目的风险,促进企业的可持续发

展。环境规制的目的是纠正企业负的外部性,以纠正市场失灵。同时,环境规制迫使企业放弃旧的生产技术与工艺流程,在技术创新中投入大量的资本或资源,造成企业经营成本不断增加。环境规制提高了企业的污染治理成本,对企业的研发投入产生挤出效应来抑制企业创新的积极性,可能会影响企业的竞争力<sup>[18]</sup>。本研究采用工业污染治理投资完成额占区域 GDP 的比例代表环境规制强度(Regulation)。

### 3.2 研究方法、模型与数据

本研究将 DEA-SBM 方法计算得到的可持续创新效率值作为因变量,以各影响因素作为自变量建立回归分析模型,分析各因素对创新效率的影响。

采用效率影响因素分析中应用最广泛的 Tobit 回归模型分析可持续创新效率( $\eta_{\text{eff}}$ )的各影响因素。将  $\eta_{\text{eff}}$  的左右截断值分别取 0 和 1,建立的回归方程如下所示:

$$\eta_{\text{eff}} = \beta_0 + \gamma X_{it} + \varepsilon_{it}$$

式中: $\eta_{\text{eff}}$ 为可持续创新效率; $\beta_0$ 为常数项; $X_{it}$ 表示各变量; $\gamma$ 为各变量的系数; $i$ 表示各省级行政区; $t$ 表示年份; $\varepsilon_{it}$ 为误差项。

可持续创新效率数据来自表 2。FDI 的数据来自 Wind 数据库。其他指标原始数据来源于历年《中国统计年鉴》《中国科技统计年鉴》等。

### 3.3 实证结果与分析

Tobit 模型的计算结果如表 3 所示。

表 3 区域可持续创新效率影响因素分析

Tab.3 Analysis results of influencing factors of regional sustainable innovation efficiency

指标	全国及各地区可持续创新效率			
	全国	东部地区	中部地区	西部地区
Government	-0.034*** (0.006)	-0.074*** (0.024)	-0.038*** (0.014)	-0.046*** (0.008)
Market	0.102*** (0.032)	-0.006 (0.037)	0.070 (0.092)	0.112*** (0.037)
Industry	-0.015*** (0.004)	-0.035*** (0.009)	-0.007 (0.009)	0.015*** (0.006)
FDI	0.029** (0.014)	0.066*** (0.022)	0.062 (0.060)	-0.100** (0.042)
Infrastructure	0.287*** (0.058)	0.677*** (0.172)	-0.104 (0.167)	0.637*** (0.100)
Regulation	-0.388** (0.184)	-2.563*** (0.806)	-1.028** (0.414)	-0.159 (0.168)
常数项	1.295*** (0.179)	2.270*** (0.482)	1.225** (0.505)	-0.170 (0.253)
$R^2$	0.359	0.463	0.175	0.778

注:回归变量系数下方的括号内是  $t$  统计量;\*、\*\*、\*\*\*分别表示在 10%、5%、1% 的水平上显著。

政府经费支持力度对区域可持续创新效率有显著负影响,通过了 1% 显著性检验。这说明政府对企业的研究经费支持并没有起到提升企业创新能力的作用,反而由于挤出效应挤占企业的研发经费,导致企业过度依赖政府资金支持,降低了企业的创新能力。政府作为区域创新系统中的重要组成部分,影响着区域创新系统的运行。

技术市场成熟度对区域可持续创新效率有显著的正影响,通过了 1% 显著性检验。这就说明技术市场有助于促进创新成果的转化,提高创新效率。

产业结构与区域可持续创新效率显著负相关,通过了 1% 显著性检验。这表明第二产业占比越高,创新效率越低。近年来中国的产业结构逐步升级,降低第二产业比重有利于促进可持续创新能力的提升。

FDI 与区域可持续创新效率显著正相关,说明外商直接投资促进了创新效率的提升。外商直接投资为研发活动带来了技术与资金,迫使企业加速创新以提升竞争力,不断提升创新效率。充分利用好外商投资,是提升区域创新能力的有效途径。

交通基础设施对区域可持续创新效率有显著的正影响,增加区域高速公路里程有助于区域创新资源的交流和创新产出的销售,进而提升区域的创新效率。可以看出,微观环境能够显著地影响创新效率。基础设施越完善,创新效率越高。推进区域经济一体化,完善交通设施,对于提升区域创新效率大有裨益。

环境规制对于区域可持续创新效率有着显著的负影响,说明环境规制在减少非期望产出的同时,也挫伤了企业创新的积极性,影响了企业的创新效率。

在当前发展形势下,如何平衡环境规制的利与弊,实现环境质量与创新效率的提升,依然值得深思。

从东部地区来看,政府经费支持力度、产业结构、外商直接投资水平、交通基础设施水平、环境规制强度对于区域可持续创新效率有显著影响,技术市场成熟度对于区域可持续创新效率没有显著影响。东部地区外商直接投资水平越高、交通基础设施水平越高,则其可持续创新效率越高。政府经费支持力度越大、产业结构越高、环境规制强度越大,则其可持续创新效率越低。东部地区正逐步提升区域一体化发展,促进了科技创新资源配置,科技创新水平较高。提高外商直接投资水平、增加交通基础设施能够显著提升东部地区的可持续创新效率。东部地区应当发挥创新优势,继续探索可持续创新协同治理的模式与路径。

对于中部地区而言,可持续创新效率受到创新基础与环境规制的影响较为显著。政府经费支持力度与环境规制对中部地区效率有显著的负影响,其他因素无显著影响。政府经费支出占比越高,区域可持续创新效率越低,说明中部地区政府经费支出的挤出效应较为严重。环境规制显著地降低了中部地区的区域可持续创新效率,未能促进区域创新发展。中部地区创新效率相对较低,提高中部地区的可持续创新效率需注意影响因素作用的发挥,协调政府研发经费支持与企业研发经费,适度降低环境规制强度。中部地区应当大力完善区域创新网络,强化企业的主体地位,提升区域创新效率。

西部地区的可持续创新效率受到政府经费支持力度、技术市场成熟度、产业结构、外商直接投资水平与交通基础设施水平等因素的显著影响,环境规制强度因素无明显影响。政府经费支出占比越高,西部地区的可持续创新效率越低,说明西部地区政府经费支出的挤出效应比较严重。西部地区的政府行政能力建设不足,在一定程度上束缚了企业的创新发展。西部地区经济及科技发展水平相对落后,城市群一体化协调发展机制不完善,尚未实现区域内的协同发展。西部地区对外开放程度不高,外商投资水平落后于东部和中部地区。外商直接投资带来的技术与资金未能带动西部地区的创新,反而抑制了西部地区创新效率的提升。技术市场成熟度与西部地区的可持续创新效率正相关,说明技术市场成熟度有助于提升西部地区的可持续创新效率。西部地区第二产业比重越高,区域可持续创新效率越高。交通基础设施水平与西部地区的可持续创新

效率正相关,说明在西部地区增加交通基础设施能够显著提升区域的可持续创新效率。西部地区的环境治理监管机制有待完善,以更好地推动经济与环境的可持续发展。

## 4 结论与政策建议

中国的区域可持续创新效率整体偏低,区域间可持续创新效率差异明显。全国整体的可持续创新效率呈现缓慢上升的趋势,这表明中国在创新投入、环境保护和节能减排方面的持续努力已经取得成效。然而,目前中国可持续创新效率仍然偏低,还有较大的上升空间。此外,区域间的效率差异较大,东部地区明显高于中部和西部地区。中部和西部地区的可持续创新效率比较类似。经济发达的东部地区创新效率较高,经济落后的中西部地区创新效率比较低。东部地区的创新资源较为集聚,经济较为发达,能够较好地提升创新效率。目前为止,东部地区仍然是推动中国技术创新发展的主要力量。重视科技创新与环境保护、减少污染物排放与能源消耗的省级行政区通常具有较高的可持续创新效率。环境污染严重、能源消耗较高的省级行政区可持续创新效率相对较低。可持续创新效率受到非期望产出指标的直接影响。

各因素对中国东中西部地区可持续创新效率影响的显著性差异较大。从全国范围来看,技术市场成熟度、外商直接投资水平与交通基础设施水平有助于提升区域可持续创新效率,政府经费支持力度、产业结构与环境规制强度则降低了区域可持续创新效率。政府经费支出的挤出效应挤占了企业的研发经费,导致企业创新能力下降。外商直接投资水平和交通基础设施对于区域可持续创新效率有着显著的正影响。外商直接投资水平越高、交通基础设施越完善,越有利于提升区域可持续创新能力。环境规制阻碍了中国区域可持续创新效率的提升,环境规制在减少非期望产出的同时,也影响了企业的创新效率。各因素对东中西部地区可持续创新效率的影响程度并不相同。各因素对不同区域的影响不同,体现了不同区域创新系统的异质性。基于所得结论,对推进我国区域可持续创新效率提出以下政策建议:

第一,推进各部门科技创新协调长效机制建设,破除地方行政束缚,完善统筹协调和决策机制。政府是区域创新系统的重要组成部分,能够提供政策



保障及资金支持。受各地区人文环境、资源禀赋差异的影响,不同地区的政策时有冲突,在一定程度上制约了区域创新活动。地方政府往往为了维护本地区的利益,而不考虑全局及长期的发展。当前,区域一体化发展的趋势日益明显,应当注重从区域整体的角度来考察可持续创新与经济发展,而不能仅局限于各自的行政区内。创新协调治理应当加强科技创新法规体系顶层设计,完善科技创新政策法规体系,强化法治保障。同时,继续建立健全各层面科技创新宏观决策的部门协同联动机制,形成多主体参与、高效运行的管理机制,加强跨地区、跨部门的协调配合,促进科技创新资源的开放流动,推动区域整体协同发展。

第二,完善以企业为主体的区域创新网络,发挥政府治理优势,深化科技创新协同治理理念,加强创新主体的协同互动。科技创新治理要充分发挥各类主体的积极性,建立政府、市场、社会各司其职,多元共治的协同创新治理模式,提升科技创新的质量和效率。重视企业的创新主体地位,发挥高校、科研机构的知识创新作用。各地政府作为区域创新网络的重要节点,应当重视其在区域创新中的功能和作用,发挥宏观调控优势,完善政策体系,优化制度环境,制定相关科技战略,营造良好的科技创新制度环境。同时,尊重市场规律,加快政府职能转变,发挥市场的决定性作用。

第三,重视可持续创新治理,适宜建立健全监管机制,推动经济与环境的可持续发展。可持续创新治理需要好的政策与实践,应当建立健全监管机制,配套行政命令与市场导向政策,追踪企业的创新活动,及时处理环境污染相关问题。地方政府常常倾向于追求短期利益而忽略长期发展,中央政府应当从长远角度看待环境问题。各级政府应当调整当前的评价体系,把能源消耗与环境污染因素纳入经济活动核算中。实现区域可持续发展,在增加创新的期望产出的同时,需要注意减少非期望产出的产生。能源消耗与环境污染能够影响创新效率,因此有必要继续增加技术投资以降低创新过程中的能源消耗,减少环境污染。

第四,加强可持续创新效率的影响因素发挥,有针对性地优化创新环境。从全国范围来看,增加政府科技投入、加强企业和科研机构的联系、提高进出口水平、完善交通基础设施等有助于提升区域可持续创新效率,政府可以在这些方面加大力度,继续优化创新环境。同时,降低政府经费支出对企业研发

资金的挤出效应,进行适度的环境规制。此外,应当根据不同的区域特征,发挥区域优势,有针对性地优化创新环境。东部地区适宜继续增加公共教育支出,提高劳动力素质水平;中西部地区需增加公共教育支出,完善技术市场,优化产业结构。每个省级行政区要根据发展情况,发挥自身优势,制定符合自身发展的政策。

#### 作者贡献声明:

陈强:分析当前研究现状,指导研究方向,审查研究内容和结果的合理性。

徐凯:提出论文主要创新点,负责具体的研究工作,收集数据并计算分析,撰写论文。

#### 参考文献:

- [1] WANG Q, JIANG R. Is China's economic growth decoupled from carbon emissions? [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 225: 1194.
- [2] GAO Y, TSAI S, XUE X, *et al.* An empirical study on green innovation efficiency in the green institutional environment [J]. *Sustainability*, 2018, 10(3): 724.
- [3] 罗良文,梁圣蓉. 中国区域工业企业绿色技术创新效率及因素分解[J]. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(9): 149.  
LUO Liangwen, LIANG Shengrong. Green technology innovation efficiency and factor decomposition of China's industrial enterprises [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(9): 149.
- [4] 钱丽,王文平,肖仁桥. 共享投入关联视角下中国区域工业企业绿色创新效率差异研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(5): 27.  
QIAN Li, WANG Wenping, XIAO Renqiao. Research on the regional disparities of China's industrial enterprises green innovation efficiency from the perspective of shared inputs [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(5): 27.
- [5] 陈景新,张月如. 中国区域绿色创新效率及影响因素研究[J]. *改革与战略*, 2018, 34(6): 72.  
CHEN Jingxin, ZHANG Yueru. Research on regional green innovation efficiency in China and its factors [J]. *Reformation & Strategy*, 2018, 34(6): 72.
- [6] 李晓阳,赵宏磊,林恬竹. 中国工业的绿色创新效率[J]. *首都经济贸易大学学报*, 2018, 20(3): 41.  
LI Xiaoyang, ZHAO Honglei, LIN Tianzhu. The green innovation efficiency of Chinese industry [J]. *Journal of Capital University of Economics and Business*, 2018, 20(3): 41.
- [7] 沈能,周晶晶. 技术异质性视角下的我国绿色创新效率及关键因素作用机制研究:基于Hybrid DEA和结构化方程模型[J]. *管理工程学报*, 2018, 32(4): 46.  
SHEN Neng, ZHOU Jingjing. A study on China's green innovation efficiency evaluation and functional mechanism based on hybrid DEA and SEM model [J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2018, 32(4): 46.

- [8] LIU C, GAO X, MA W, *et al.* Research on regional differences and influencing factors of green technology innovation efficiency of China's high-tech industry[J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2020, 369: 112597.
- [9] 李文鸿,曹万林. FDI、环境规制与区域绿色创新效率[J]. *统计与决策*, 2020(19): 118.  
LI Wenhong, CAO Wanlin. FDI, environmental regulation and regional green innovation efficiency [J]. *Statistics & Decision*, 2020(19): 118.
- [10] 吕承超,邵长花,崔悦. 中国绿色创新效率的时空演进规律及影响因素研究[J]. *财经问题研究*, 2020(12): 50.  
LÜ Chengchao, SHAO Changhua, CUI Yue. The spatio-temporal evolution rule and influencing factors of China's green innovation efficiency [J]. *Research on Financial and Economic Issues*, 2020(12): 50.
- [11] 赵路,高红贵,肖权. 环境规制对绿色技术创新效率影响的实证[J]. *统计与决策*, 2021(3): 125.  
ZHAO Lu, GAO Honggui, XIAO Quan. Impact of environmental regulation on green technology innovation efficiency[J]. *Statistics & Decision*, 2021(3): 125.
- [12] YANG T, CHEN W, ZHOU K, *et al.* Regional energy efficiency evaluation in China: a super efficiency slack-based measure model with undesirable outputs[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 198: 859.
- [13] FENG Z, TANG W, NIU Z, *et al.* Bi-level allocation of carbon emission permits based on clustering analysis and weighted voting: a case study in China [J]. *Applied Energy*, 2018, 228: 1122.
- [14] 黄贤凤,武博,王建华. 中国八大经济区工业企业技术创新效率及其影响因素研究[J]. *中国科技论坛*, 2013(8): 90.  
HUANG Xianfeng, WU Bo, WANG Jianhua. Technology innovation efficiency of industrial enterprises in China's eight economic zones and its influencing factors [J]. *Forum on Science and Technology in China*, 2013(8): 90.
- [15] 刘伟. 考虑环境因素的高新技术产业技术创新效率分析:基于2000—2007年和2008—2014年两个时段的比较[J]. *科研管理*, 2016, 37(11): 18.  
LIU Wei. Technological innovation efficiency of high-tech industries considering environmental factor in China: comparison of two periods from 2000—2007 and from 2008—2014[J]. *Science Research Management*, 2016, 37(11): 18.
- [16] LUO Q, MIAO C, SUN L, *et al.* Efficiency evaluation of green technology innovation of China's strategic emerging industries: an empirical analysis based on Malmquist-data envelopment analysis index [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 238: 117782.
- [17] RENNINGS K, RAMMER C. The impact of regulation-driven environmental innovation on innovation success and firm performance[J]. *Industry & Innovation*, 2011, 18(3): 255.
- [18] AMBEC S, COHEN M-A, ELGIE S, *et al.* The Porter hypothesis at 20: can environmental regulation enhance innovation and competitiveness? [J]. *Review of Environmental Economics and Policy*, 2013, 7(1): 2.

### (上接第374页)

- 隐患电阻率成像[J]. *地球物理学进展*, 2017, 32(4): 1868.  
ZHANG Zaiyuan, ZHAO Yonghui, GE Shuangcheng. Electrical resistance tomography for underground diaphragm wall defect based on Bayesian inversion [J]. *Progress in Geophysics*, 2017, 32(4): 1868.
- [25] QIN H, VRUGT J A, XIE X, *et al.* Improved characterization of underground structure defects from two-stage Bayesian inversion using crosshole GPR data [J]. *Automation in Construction*, 2018, 95: 233.
- [26] ASTER R C, BORCHERS B, THURBER C H. *Parameter estimation and inverse problems* [M]. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2005.
- [27] VRUGT J A, TER BRAAK C J F, DIKS C G H, *et al.* Accelerating Markov Chain Monte Carlo simulation by differential evolution with self-adaptive randomized subspace sampling [J]. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 2009, 10(3): 273.
- [28] PRESS W H, FLANNERY B P, TEUKOLSKY S A, *et al.* *Numerical recipes in C: the art of scientific computing* [M]. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 1996.
- [29] SMITH I M, GRIFFITHS D V, MARGETTS L. *Programming the finite element method* [M]. 5th ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2015.
- [30] BODIN T, SAMBRIDGE M, GALLAGHER K. A self-parametrizing partition model approach to tomographic inverse problems[J]. *Inverse Problems*, 2009, 25: 055009.
- [31] DENISON D, HOLMES C, MALLIK B, *et al.* *Bayesian nonlinear method for classification and regression* [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2002.
- [32] METROPOLIS N, ROSENBLUTH A W, ROSENBLUTH M N, *et al.* Equations of state calculations by fast computing machines[J]. *Journal of Chemical Physics*, 1953, 21: 1087.
- [33] GELMAN A, RUBIN D B. Inference from iterative simulation using multiple sequences [J]. *Statistical Science*, 1992, 7(4): 457.
- [34] SMETHURST J A, POWRIE W. Monitoring and analysis of the bending behaviour of discrete piles used to stabilise a railway embankment[J]. *Géotechnique*, 2007, 57(8): 663.
- [35] ZHANG C, LAMBERT M F, GONG J, *et al.* Bayesian inverse transient analysis for pipeline condition assessment: parameter estimation and uncertainty quantification [J]. *Water Resources Management*, 2020, 34: 2807.