

科研绩效的多阶嵌套DEA评价模型

任孝平^{1,2} 杨云¹ 杨东² 苏爽² 周小林¹

(1. 科技部科技评估中心 国际部, 北京 100081;

2. 中国计量科学研究院科技管理部(国际合作), 北京 100029)

摘要: 根据传统DEA方法进行科研效率评价时所存在的问题, 以面向科研过程的方式, 分解了具有复杂内部结构的科研类决策单元, 提出了基于DEA的多阶嵌套评估模型, 用以评价研究机构的科研绩效。该方法克服了传统DEA方法评估科研绩效大面积有效的情形, 从更深层面挖掘影响科研绩效的因素, 为优化科研管理, 提升科研绩效提供有力分析工具。最后, 通过对国家计量院13个专业所的科研绩效进行评估来验证模型的合理性与有效性。

关键词: 多阶嵌套模型; DEA方法; 科研过程分解; 科研效率; 绩效评估

中图分类号: X936

文献标识码: A

DOI: 10.3772/j.issn.1674-1544.2020.02.008

Multi-stage Nested Evaluation Model Based on DEA

REN Xiaoping^{1,2}, YANG Yun¹, YANG Dong², SU Shuang², ZHOU Xiaolin¹

(1. Department of International Evaluation and Research, National Center for Science & Technology Evaluation, Beijing 100081; 2. Department of Research and Science Management, National Institute of Metrology, Beijing 100029)

Abstract: According to the problems existing in the traditional data envelopment analysis (DEA) method using in scientific research (S&R) performance evaluation, this paper proposes a new multi-stage nested evaluation model based on DEA in a research-oriented way. In this new model, S&R decision making unit (DMU) of complicated internal structure is decomposed. This model solves the problems that, large scale of S&R performance evaluation results remain efficiency in traditional DEA method. And also, it can find the influential factors of S&R efficiency from a deeper level, in order to provide analysis tools for optimizing S&R management and promoting S&R performance. Finally, an empirical case about S&R performance evaluation of the national institute of metrology (NIM) is introduced to verify the rationality and validity of the model in this paper.

Keywords: multi-stage nested model, DEA method, S&R procedure decomposition, scientific research efficiency, performance evaluation

作者简介: 任孝平(1984—), 男, 科技部科技评估中心副研究员, 研究方向: 科技管理、科技政策; 杨云(1972—), 女, 科技部科技评估中心研究员, 研究方向: 科技政策、国际合作(通信作者); 杨东(1987—), 男, 中国计量科学研究院工程师, 研究方向: 科技管理; 苏爽(1984—), 女, 中国计量科学研究院工程师, 研究方向: 科技管理; 周小林(1987—), 女, 科技部科技评估中心副研究员, 研究方向: 科技政策。

基金项目: 中国计量科学探索性科技项目“基于大数据挖掘的院科研网络中心度初步研究”(AKYCX1703); “院科研成果竞争能力初探与分析”(AKYCX1801)。

收稿日期: 2019年4月27日。

0 引言

1978年, Charnes等提出数据包络分析(DEA), 以评价具有多输入和多输出的同类决策单元(DMU)的相对效率。2013年, Liu等^[1]对DEA的应用进行综述时发现, 63.6%的相关论文为基于DEA的实证研究, 如银行^[2]、健康、农业^[3]等行业领域; 33.3%的论文集中于DEA理论研究, 其中, 多阶DEA^[4-6]和网络DEA^[7]是主要方向。在科技创新领域, DEA同样是实施科研绩效评价^[8]和资源配置^[9]的主要方法之一, 但大多集中于区域创新^[10-11]、省市级创新^[12]、企业创新^[13-14]及高校管理等^[15]。

研究发现, 学者在进行科研绩效评估时, 直接将被评对象的科研投入和科研产出代入到模型中进行效率计算^[16], 并未分析决策单元(DMU)的内部机制。尤其是在进行科研绩效评估时, 将科研过程看成一个整体进行效率测算, 而忽视了科学研究是一个环环相扣的过程^[13]。赵春英等^[17]还指出, 传统DEA模型在评价DMU有效性时, 投入/产出指标的地位同等, 投入/产出指标的权重系数无任何约定。然而, 产出指标在科研过程中, 仅是阶段性“结果”, 而效果和影响指标是科研中更为重要的“输出”。

研究还表明, 将科学研究所有环节中的绩效指标混在一起进行评估的结果, 会导致评估结果中出现大量, 甚至全部DMU都为有效的情形(效率为1)。这种现象源于每个DMU均从最有利于自身的角度计算权重, 造成DMU的特性缺乏可比性^[18]。即将所有产出指标混在一起计算时, 每个DMU的缺陷容易被其他较好的指标所覆盖, 从而使决策者忽视了短板。因此, 采用传统的DEA方法直接对DMU进行评估, 所得的绩效排序还不够, 必须做深入的分析。

目前, 已经有学者开展两阶^[4]、三阶^[5,19]、多阶^[6]的DEA模型研究, 并应用于环保^[16]、文化^[20]、科技园区^[19]等对象的评估。如两阶段DEA-Tobit组合模型, 即通过DEA测算效率, 然后以效率为因变量、各阶段的影响因素作为自

变量进行回归分析, 以得到各种因素对因变量的影响程度^[14]。Ji等^[21]在对城市化的可持续性发展进行实证研究时, 采用了两阶混合异构DEA模型(Hybrid heterogeneous DEA)。窦超等^[13]提出加法分解两阶段DEA模型方法, 将决策单元“黑箱”分解为“知识创新”和“经济产出”两个阶段。马建峰等^[22]同样对企业技术创新过程进行分解, 按照“技术研发”和“技术应用”两个子阶段设计了DEA串联模型。可见, 分析和拆解DMU的内部结构, 构建多阶DEA模型是对投入产出效率进行深层次分析的主要方法。

为了对科研院所科研绩效进行深度评价, 本文拟在传统DEA模型的基础上, 给出一种多阶嵌套式DEA评估模型, 对科研过程绩效进行评价。该评价方法首先根据科学研究的实际过程, 将其细化分解为3个子阶段; 然后将“人员投入”看作多次投入, 引入各子阶段并建立三阶嵌套DEA模型; 最后基于该模型进行效率计算。模型的构建仍然基于科学研究的基本流程, 具有科学性; 效率计算的复杂度并未提高, 仍可基于各类软件进行测算。实证结果显示: 多阶嵌套DEA评价模型可以给出科学研究各阶段的效率, 可以反映科学研究各阶段哪里薄弱的结论, 同时还消除了传统DEA方法计算时效率大面积为1的情形, 提高了方法的适用性。

1 科研过程分解和指标框架设计

科学研究是在已有科研积累的基础上, 投入经费和人力进行再创新的过程。为了研究科学研究与经济效益、社会影响相结合的程度, 本文基于科学研究的基本过程, 提出将其分解为科研投入、科研产出、科研效果以及科研影响4个环节(图1), 并对创新主体从科研投入到转化为经济效益以及产生社会影响这一系列过程进行描述, 再在此基础上构建评价指标体系。

科研投入指标主要考察人力、财力以及科研基础等^[14]。其中, 科研基础指研究所以往的科研获奖情况, 该指标在参考文献[6]中也有引入。科研产出指标包括科研论文、发明专利以及软件

著作等初级产出；其他产出指标还包括试验装置、技术标准、技术规范、研究所内部奖励等。科研效果指标则有经济效益、国家奖励等。科研影响类指标，则以不易量化的指标居多，并且将随上一环节经济效益的增加、科技奖励的积累而不断扩大。表 1 为本文构建的评价指标框架。

2 绩效评估模型构建

传统的DEA模型（图 2）中，将研究产出与经济效益、社会效益等效果类指标^[8]，同时作为DMU的输出。这种方式的缺点是初级指标（产出指标）会干扰权重较高的高级指标（影响指标）。因此，本文给出了带有阶段性产出的DMU内部结构模型（图 3）。与图 2 相比，将科研过程分为若干决策单元环节（DMU-Procedure，

DMUP），每个环节都同时考虑了固定人员投入的情况。

如图 3 所示，在第一个环节（DMUP1）中，分析科研投入与初级产出的效率。投入指标包括科研经费、科研人员以及以前年度科研积累。产出指标包括发表SCI论文、授权专利以及授权软件著作权。

DMUP2 在上一环节的基础上，获得了试验装置、技术标准等科研产出。此外，在该环节中，仍离不开人员和经费的持续投入。但考虑到经费无法分解到各个环节。因此，本文研究假设“科研经费在DMUP1 环节一次性进行了投入，而科研人员在整个科研过程中保持不变”。

DMUP3 为科研过程的最后一个环节，最终获得直接经济效益、省部级奖励、国家级奖励

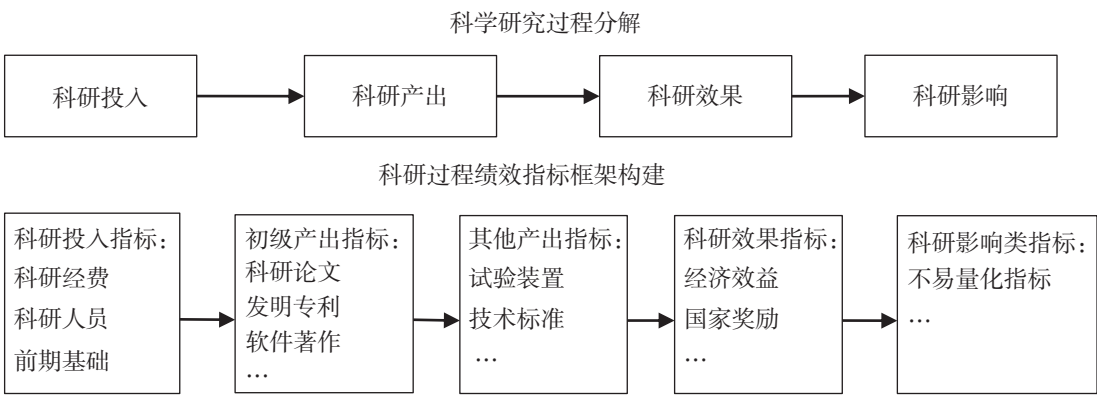


图 1 面向科研过程的决策单元分解和指标框架构建

表 1 面向科研过程的科研绩效评价指标框架

科研过程	一级指标	二级指标	符号
研究初期	科研投入	科研经费/万元	x_1
		科研人员/名	x_2
		科研基础（国家奖数量）/个	x_3
研究中期	科研产出	SCI科研论文/篇	y_1
		授权发明专利/件	y_2
		授权软件著作权/件	y_3
		试验装置/台	z_1
		技术标准/个	z_2
		内部奖励/个	z_3
研究末期	科研效果	直接经济效益/万元	o_1
		省部级奖励/个	o_2
		国家级奖励/个	o_3
研究结束	科研影响	以不易量化指标居多	—

等。

研究结束后,随着经济效益的不断增加,最终积累为科研影响之一(经济影响);同时,随着各类奖项的获得,最终积累为科研影响之二(社会影响)。该部分在图3中用虚线框表示,由于未纳入本文科研绩效评价的范畴,因此未将其列为DMUP4环节。

3 实证分析

本文实证分析的对象是中国计量科学研究院^[23](简称“国家计量院”)13个专业研究所。基于2008—2018年《院科技年报》数据,将2008—2011年省级、国家奖奖励数据作为科研基础(x_3),对各专业所2012—2018年总体科研绩效进行计算。由于不是年度科研绩效,因此不计入科研产出的时滞^[6,12]影响因素。

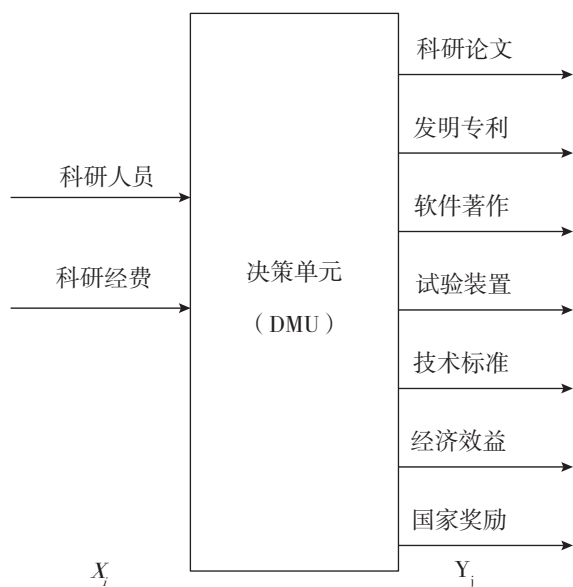


图2 一阶科研绩效评估模型

根据图2构建的科研绩效评估模型,运用DEAP 2.1软件分别对4个科研环节的效率进行测算(表2)。

DMUP1环节包括3个输入和3个输出。表2显示,2012—2018年,13个专业研究所中有9个研究所达到了DEA有效,见表2最后一列 γ_{DMUP1} 。若未引入研究基础(x_3)因子,则只有7个研究所达到DEA有效,见表2倒数第二列 γ'_{DMUP1} 。以专业所X为例,其研究基础为0,若未引入该因子,其初期效率仅为0.483,引入后提升为0.818;同样的情况在专业所C、N、NH上也有体现。可见,在开展科研绩效评价时,不仅仅只有人力和财力的投入,还有“研究基础”这个隐形投入,若不引入计算,则不符合科学研究的实际情况,会导致初期科研效率偏低。

在DMUP1环节,13个专业所在获得SCI论文(y_1)、授权专利(y_2)、授权软件著作权(y_3)等产出后,将其作为DMUP2环节投入并形成进一步产出。表1中的试验装置、技术标准、内部奖励等,在具体分析时,以国家计量院的计量基准(z_1)、计量标准(z_2)、院内奖励(z_3)等数据代入分析。

DMUP2环节包括4个输入和3个输出。表3中,同时给出了未引入DMUP1环节人员投入(x_1)的综合效率值。总体来看,引入人员投入后,S、Y等5个专业所综合效率有大幅提升。需说明的是,单位内部奖励与省部级、国家级奖励水平相差较多,因此在本文研究中,将其当作一般产出对待。

DMUP3环节包括4个输入和3个输出。表

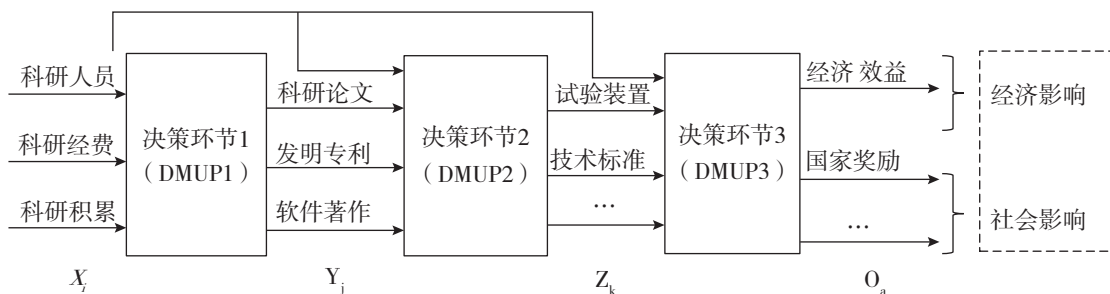


图3 多阶嵌套的科研绩效评估模型

4 中,同时给出了未引入DMUP1 环节人员投入 (x_1) 的综合效率值。总体来看,引入人员投入后,S、Y 等 5 个专业所综合效率大幅提升。

4 实证分析结果

通过构建三阶段DEA 模型,对 2012—2018 年国家计量院 13 个二级专业所的科研绩效进行分析。多阶段效率交叉分析方法参见文献[24],本文以 $\gamma_{DMUP1} \times \delta_{DMUP2} \times \varepsilon_{DMUP3}$ 的方式得到综合效率(表 5),并得出如下结论。

(1) 研究初期

如表 5 所示,在科研初期,L、S、G 等 9 个专业所综合效率值均为 1,表明这几个专业所达到了 DEA 有效,初期投入资源配置达到了最优状态;R、D、X 的综合效率在 0.8 ~ 1 之间,处于中上等水平,若要达到最优,仍需提高初级产出。C 的研发效率低于 0.5,分析数据发现其投入的人力财力虽然多,但没能有效地转化为初期产出,SCI 论文、专利授权和软件著作数量落后,导致其综合效率较低。

(2) 研究中期

在科研中期,国家计量基准、标准等是高于

表 2 2012—2018 年各专业所 DMUP1 环节综合效率值

研究所	人数 (人) x_1	科研经费 (万元) x_2	研究基础 (个) x_3	SCI 论文 (篇) y_1	授权专利 (件) y_2	授权软件著作 (件) y_3	未引入 x_3 的 综合效率 γ'_{DMUP1}	引入 x_3 的 综合效率 γ_{DMUP1}
C	47	12796.3	0	14	19	1	0.405	0.454
R	54	20721.0	1	81	35	2	0.904	0.904
L	71	19827.5	1	57	53	14	1	1
D	52	21058.1	3	71	37	4	0.851	0.851
S	29	19647.7	4	43	25	12	1	1
X	55	14359.2	0	31	11	3	0.483	0.818
G	43	12373.6	1	54	25	6	1	1
DL	26	16101.8	0	15	48	2	1	1
H	90	37350.0	2	179	52	10	1	1
N	37	13275.0	0	39	30	1	0.853	1
NH	54	14336.5	0	29	15	9	0.889	1
Y	33	16014.6	0	35	51	6	1	1
GC	17	3869.7	0	8	18	0	1	1

表 3 2012—2018 年各专业所 DMUP2 环节综合效率值

研究所	人数 (人) x_1	SCI 论文 (篇) y_1	授权专利 (件) y_2	授权软著 (件) y_3	计量基准 (个) z_1	计量标准 (个) z_2	院奖 (个) z_3	未引入 x_1 的综 合效率 δ'_{DMUP2}	引入 x_1 的综 合效率 δ_{DMUP2}
C	47	14	19	1	7	41	4	1	1
R	54	81	35	2	9	37	13.5	1	1
L	71	57	53	14	35	58	25	1	1
D	52	71	37	4	13	30	7	0.567	0.699
S	29	43	25	12	2	6	7	0.42	0.686
X	55	31	11	3	14	28	11	1	1
G	43	54	25	6	20	36	13.5	0.77	1
DL	26	15	48	2	18	15	8	1	1
H	90	179	52	10	2	32	18	0.449	0.682
N	37	39	30	1	7	39	7	1	1
NH	54	29	15	9	0	15	8	0.729	0.729
Y	33	35	51	6	1	17	8	0.514	0.7
GC	17	8	18	0	0	5	3	1	1

表4 2012—2018年各专业所DMUP3环节综合效率值

研究所	人数 (人) x_1	计量基准 (个) z_1	计量标准 (个) z_2	院奖(个) z_3	经济效益 (万元) o_1	国家奖励 (件) o_2	省级奖励 (个) o_3	未引入 x_1 的综合 效率 ε'_{DMUP3}	引入 x_1 的综合效 率 ε_{DMUP3}
C	47	7	41	4	16842.6	0	2	1	1
R	54	9	37	13.5	16959.5	2	7	1	1
L	71	35	58	25	25416.8	0	22	0.702	0.943
D	52	13	30	7	16400.6	1	6	1	1
S	29	2	6	7	1968.1	1	10	1	1
X	55	14	28	11	24605.3	0	5	0.685	0.795
G	43	20	36	13.5	18675.5	0	14	0.845	1
DL	26	18	15	8	12888.4	0	5	0.627	0.967
H	90	2	32	18	32306.2	2	17	1	1
N	37	7	39	7	8905.9	0	5	0.615	0.657
NH	54	0	15	8	18542.2	0	9	1	1
Y	33	1	17	8	8050.4	0	7	0.697	0.905
GC	17	0	5	3	9566.0	0	2	1	1

表5 2012—2018年各专业所科研综合效率值

研究所	DMUP1 综合效率 γ_{DMUP1}	DMUP2 综合效率 δ_{DMUP2}	DMUP3 综合效率 γ_{DMUP1}	3 阶评估模型 (图3) 综合效率	1 阶评估模型 (图2) 综合效率
C	0.454	1	1	0.454	1
R	0.904	1	1	0.904	1
L	1	1	0.943	0.943	1
D	0.851	0.699	1	0.595	0.942
S	1	0.686	1	0.686	1
X	0.818	1	0.795	0.650	1
G	1	1	1	1	1
DL	1	1	0.967	0.967	1
H	1	0.682	1	0.682	1
N	1	1	0.657	0.657	1
NH	1	0.729	1	0.729	1
Y	1	0.7	0.905	0.634	1
GC	1	1	1	1	1

论文、专利等产出的。在综合效率方面,8个专业所DEA均达有效。其中,C、R、X在DMUP1阶段效率小于1,在DMUP2阶段有提升。相反,D、S、H、NH、Y反而有所降低。表明这几个专业所科研中仅停留在发表论文、专利方面,在形成试验装置、技术标准方面产出不足。此外,L、G、DL、N和GC在两个阶段均达到DEA有效。

(3) 研究末期

在研究末期,以获得省部级奖、国家奖以及产生直接经济效益作为效果指标。总体来看,8个专业所DEA有效。其中,C、R、D、S、H、

NH效率高过其在前两个环节的效率。C和R是总体上升的,这表明其论文、专利等产出效率较低,但都转化为了实物计量基准;而其他专业所在第一环节效率较好,在第二环节效率降低,转化为计量基准、标准有所不足。Y的趋势总体与C、R、D专业所类似。

L、DL、N的效率低于前两个阶段,这3个专业所的直接经济效益能力尚可,但是取得国家奖的能力偏弱,导致效率有所下降。X的综合效率总体上是先升后降,其工作重心放在了产出计量基准上,但是尚未转化为各类奖项。G和

GC的综合效率始终保持DEA有效,是使用资源最佳的两个专业所。

(4) 综合分析

在前3个科研环节中,各专业所都获得了相似的产出类型,但是到DMUP4环节,各专业所的科研绩效会发生趋势性变化:有的专业所明显更偏向于产出经济收益,而有的专业所偏向于取得高水平的科研成果及奖励。

因此,根据分类评价原则,本文针对DMUP3环节的产出和DMUP4环节的输入,在科研绩效评估模型(图3)中构建了“经济影响”和“社会影响”两条子过程。对DMUP3环节的综合效率做进一步分析,得到DMUP3环节经济产出效率 α_{DMUP3} (表6)和知识产出效率 β_{DMUP3} (表7)。

将表2中DMUP1、表3中DMUP2环节的效率 γ_{DMUP1} 和 δ_{DMUP2} ,分别与表6、表7的效率相乘,绘制科研绩效矩阵图(图4)。

分析可知,G、L和NH的各方面效率均较好;Y、D、N、C的知识产出效率和经济产出效率均低于中位值水平;GC、DL、X的经济产出效率较高;R、L、G的知识产出效率较高。

5 结语

本文将科研过程分解为“投入—产出一效

果—影响”4个环节,打开决策单元运行“黑箱”。进一步构建了多阶嵌套式的评估模型,采用DEA方法分别测算每个环节的科研绩效,揭示研究所在科学研究各环节间的内在联系。利用2012—2018年数据测算国家计量院13个专业所的科研绩效,并从经济产出和知识产出考察了各专业所的绩效分布情况。得到以下几点结果。

(1) 单纯的DEA方法,已不能满足科研院所绩效评价。对科研院所的科研过程进行分析和拆解,打破决策“黑箱”,有助于深入分析科研绩效,同时该方法还能有效解决传统DEA方法在计算投入/产出效率时计算结果大面积有效(效率为1)的情形。

(2) “投入—产出一效果—影响”的科研全链条评估模型是较好的分解维度。需注意的是,科研前期,各专业所产生的成果类型较为相似,因此对科研院所进行分类评价时,在科研环节后端进行区分更为有效。

(3) 在构建科研绩效评价指标时,需满足指标的合理性,同时也要保证指标本身的可获取性。在实际评价中,“人员”投入指标在各科研环节中均代入评估进行效率计算,也是本文对绩效评估模型的改进。

(4) 国家计量院13个专业所DMUP2综合效率低于DMUP1效率,DMUP3阶段效率最高。可

表6 2012—2018年各专业所DMUP3环节经济产出效率

研究所	人数 (人) x_1	计量基准 (个) z_1	计量标准 (个) z_2	院奖 (个) z_3	经济效益 (万元) o_1	经济产出效率 α_{DMUP3}
C	47	7	41	4	16842.6	1
R	54	9	37	13.5	16959.5	0.558
L	71	35	58	25	25416.8	0.636
D	52	13	30	7	16400.6	0.672
S	29	2	6	7	1968.1	0.171
X	55	14	28	11	24605.3	0.795
G	43	20	36	13.5	18675.5	0.772
DL	26	18	15	8	12888.4	0.881
H	90	2	32	18	32306.2	0.638
N	37	7	39	7	8905.9	0.428
NH	54	0	15	8	18542.2	0.727
Y	33	1	17	8	8050.4	0.434
GC	17	0	5	3	9566.0	1

表7 2012—2018年各专业所DMUP3环节知识产出效率

研究所	人数 (人) x_1	计量基准 (个) z_1	计量标准 (个) z_2	院奖 (个) z_3	国家奖励 (件) o_2	省级奖励 (个) o_3	知识产出效率 β_{DMUP3}
C	47	7	41	4	0	2	0.35
R	54	9	37	13.5	2	7	1
L	71	35	58	25	0	22	0.899
D	52	13	30	7	1	6	0.978
S	29	2	6	7	1	10	1
X	55	14	28	11	0	5	0.318
G	43	20	36	13.5	0	14	0.944
DL	26	18	15	8	0	5	0.558
H	90	2	32	18	2	17	1
N	37	7	39	7	0	5	0.5
NH	54	0	15	8	0	9	1
Y	33	1	17	8	0	7	0.866
GC	17	0	5	3	0	2	0.706

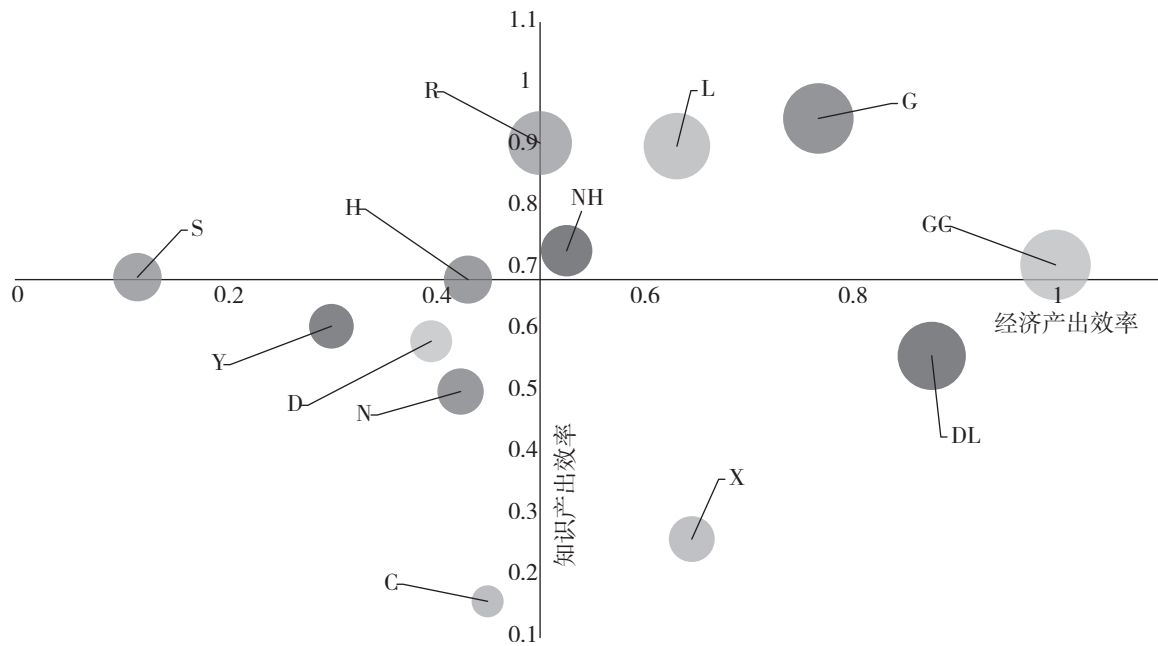


图4 专业所科研绩效矩阵示意图

见,创新上游科研经费和人员投入产出效率较高,形成了大量的论文、专利和软件著作权,但是进一步形成计量基/标准的效率偏低。尤其是,国家计量基准近十年均未有太大变化,计量标准数量也有待进一步提高。建议国家计量院在未来的创新过程中,继续强化研究中期成果的产出,将科研论文、发明专利、软件著作权等创新点,有效转化为计量基标准等科研装置;针对各个研究所的特

点和特长,鼓励利用科研成果开展对外服务,进一步将科技成果转化经济效益;同时要重视基础科研性质的研究所,其无法形成直接经济效益的,要注重转化为其他形式的知识积累和社会效益。

参考文献

- [1] LIU J S, LU L Y Y, LU W M, et al. A survey of DEA applications [J]. Omega, 2013, 41(5): 893–902. DOI:

- 10.1007/s00521-018-3428-y.
- [2] REZA M, ALI E, MORTEZA R B. A bargaining game model for performance assessment in network DEA considering sub-networks: A real case study in banking [J]. *Neural Computing and Applications*, 2018: 1-19. DOI: 10.1007/s00521-018-3428-y.
- [3] 董奋义, 齐冰. 考虑产出滞后性的北京市农业科技 DEA效率分析[J]. *农业展望*, 2018, 14(11): 79-86. DOI: 10.3969/j.issn.1004-3918.2018.05.030.
- [4] COOK W D, LIANG L, ZHU J. Measuring performance of two-stage network structures by DEA: A review and future perspective [J]. *Omega*, 2010, 38(6): 423-430. DOI: 10.1016/j.omega.2009.12.001.
- [5] LI Y J, CHEN Y, LIANG L, et al. DEA models for extended two-stage network structures[J]. *Omega*, 2012, 40(5): 611-618. DOI: 10.1016/j.omega.2011.11.007.
- [6] CHEN K H, KOU M T, Fu X L. Evaluation of multi-period regional R&D efficiency: An application of dynamic DEA to China's regional R&D systems [J]. *Omega*, 2018(74): 1-12. DOI: 10.1016/j.omega.2017.01.010.
- [7] YANG G L, FUKUYAMA H, SONG Y Y. Measuring the inefficiency of Chinese research universities based on a two-stage network DEA model [J]. *Journal of Informetrics*, 2018, 12(1): 10-30. DOI: 10.1016/j.joi.2017.11.002.
- [8] 孟澈, 刘文斌, 李晓轩. DEA在定量科研评价中的应用[J]. *科学学与科学技术管理*, 2005, 26(9): 11-16. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0241.2005.09.002.
- [9] 刘兵, 曾建丽, 梁林, 等. 基于DEA的地区科技人才资源配置效率评价[J]. *科技管理研究*, 2018, 38(14): 56-63. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7695.2018.14.008.
- [10] 刘钊, 邓明亮. 基于改进超效率DEA模型的长江经济带科技创新效率研究[J]. *科技进步与对策*, 2017(23): 54-59. DOI: 10.6049/kjbydc.201708X265.
- [11] 苏日古嘎, 马占新. “一带一路”重点省区企业科技创新效率评价: 基于广义DEA模型的实证分析[J]. *科学管理研究*, 2018, 36(6): 90-93. DOI: 10.19445/j.cnki.15-1103/g3.2018.06.023.
- [12] 郑素丽, 胡一鸣. 浙江省高新技术产业创新效率评价与优化路径: 基于双阶段DEA方法的实证研究[J]. *科技管理研究*, 2019, 39(5): 89-96. DOI: 10.3969/j.issn.2095-3151.2015.57.012.
- [13] 窦超, 熊曦, 陈光华, 等. 创新价值链视角下中小企业创新效率多维度研究: 基于加法分解的两阶段DEA模型[J]. *科技进步与对策*, 2019, 36(2): 77-85. DOI: 10.6049/kjbydc.2018040237.
- [14] 王义新, 孔锐. 价值链视角下规模以上工业企业科技创新效率及关键影响因素研究: 基于DEA-Tobit两阶段模型[J]. *科技管理研究*, 2019, 39(3): 136-142. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7695.2019.03.019.
- [15] 刘天佐, 许航. 我国不同区域高校科研投入产出绩效及其影响因素分析: 基于DEA-Tobit模型的实证研究[J]. *科技管理研究*, 2018, 38(13): 113-118. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7695.2018.13.016.
- [16] 陈磊, 王应明, 王亮. 两阶段DEA分析框架下的环境效率测度与分解[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(3): 642-649. DOI: 10.12011/1000-6788(2016)03-0642-08.
- [17] 赵春英, 马占新. 权重受限的超效率DEA模型及其投影分析[J]. *系统工程学报*, 2018, 34(1): 116-129. DOI: 10.13383/j.cnki.jse.2019.01.010.
- [18] 李美娟, 陈国宏. 数据包络分析法(DEA)的研究与应用[J]. *中国工程科学*, 2003, 5(6): 88-94. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2003.06.016.
- [19] 李荣. 基于三阶段DEA模型的国家大学科技园孵化效率研究[J]. *科技管理研究*, 2019, 39(6): 93-99. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7695.2019.06.014.
- [20] 王家庭, 张容. 基于三阶段DEA模型的中国31省市文化产业效率研究[J]. *中国软科学*, 2009(9): 75-82. DOI: 10.3969/j.issn.1002-9753.2009.09.011.
- [21] JI X, WU J, ZHU Q Y, et al. Using a hybrid heterogeneous DEA method to benchmark China's sustainable urbanization: An empirical study[J]. *Annals of Operations Research*, 2019, 278(1/2): 281-335. DOI: 10.1007/s10479-018-2855-6.
- [22] 马建峰, 何枫. 包含共享投入与自由中间产出的技术创新两阶段DEA效率评价[J]. *系统工程*, 2014, 32(1): 1-9. DOI: 1001-4098(2014)01-0001-09.
- [23] 任孝平, 杨云, 南方, 等. 中国计量科学研究院国际科研合作现状评价研究[J]. *中国计量大学学报*, 2018, 29(4): 411-416. DOI: 10.3969/j.issn.2096-2835.2018.04.011.
- [24] YANG G L, YANG J B, LIU W B, et al. Cross-inefficiency aggregation in DEA models using the evidential-reasoning approach[J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 231(2): 393-404. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.05.017.