文章编号:1003-207(2014)06-0085-09

基于数据包络分析的中国城市创新能力评价

杜 娟,霍佳震

(同济大学经济与管理学院,上海 200092)

摘 要:针对城市创新能力的应用背景,构建了重点城市创新能力的评价指标体系,其中包括人才培养和科技创新两个创新阶段,提出了综合考虑共享投入和分阶段产出的两阶段数据包络分析模型,对国内52座重点城市的总体和单阶段的创新能力进行了有效评价和区分。研究结果发现,长三角和珠三角区域的创新能力在全国范围内具有优势,而创新效率相对较低的城市主要分布于中部、西南和西北的部分地区。实证分析为这些城市进一步提高自身的科技创造和研发创新水平提供重要的参考价值和指导意义。

关键词:数据包络分析(DEA);效率;两阶段;城市创新能力

中图分类号:C934;C94 **文献标识码**:A

1 引言

在与现代城市发展相关的各种研究中,创新能力已经日益成为提升城市综合竞争力的核心力量之一,也是城市可持续发展的重要组成元素之一。城市作为一个国家或者区域的政治、经济、文化、科教等中心,以及第二、第三产业的载体,构建城市技术创新体系,提升城市技术创新能力是促进经济增长和社会发展的重要保证[1]。正确而合理地对城市的创新能力进行评价和比较,可以为相关部门在政策制定和方案实施上提供重要的参考信息。一个城市的创新能力具体表现为将人力和财力等软硬件投入转化为知识创造、经济效应以及人才培养等产出的能力。

关于城市或者区域创新能力的研究方法,比较有代表性的成果包括欧洲创新记分牌(European Innovation Scoreboard)、Robert Huggins的知识竞争力指标体系、模糊综合评价、灰色聚类分析、数据包络分析、BP人工神经网络、层次分析法等。邵云飞和唐小我[2]利用SPSS对中国各区域的技术创新能力进行主成份实证研究。张立柱等[3]将城市创新能力细化为知识创新、技术创新、政府行为和服务创新四种能力,并为每种能力构建相应的评价指标。刘友金等[4]选取10个指标来代表科技投入和产出要素,并使用聚类分析的方法分析了中国省级区域的创新能力差异。李晓钟和张小蒂[5]运用比较分析的方法对于江浙地区的技术创新效率和社会效率进行研究。曹杨和王雪青[6]基于复杂系统理论中耗散结构的四个形成条件,针对资源型城市的创新能力设计评价指标体系,并构建网络层次分析评价模型进行评估。邵云飞等[7]从投入产出效率和中心化效率两层视角来衡量国内19个中心城市的自主创新效率,由此分析西部3个中心城市自主创新能力不足的原因,并给予相关政策建议。

近年来,一些学者开始将数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)方法引入城市创新能力的评价考核中,力图以整体视角客观地将各种评价指标综合考虑到效率评价的结果中。比如,池仁勇等[8]将DEA方法使用于国内多省市的技术创新效率计算和差异比较;代明和张晓鹏[9]运用DEA方法中的CCR模型,对17个国家级创新型试点城市的创新绩效进行实证研究,并根据松弛变量结果提出可能的改进方向与空间。

数据包络分析方法正式诞生于1978年,由Charnes, Cooper与Rhodes提出其首个模型CCR[10]。数据包络分析是评价具有多投入与多产出的同质决策单元(decision making units, DMU)相对效率的数学规划方法,是一种非参数的评估方法。与其它效率评价方法相比,DEA方法最为显著的优势包括:(1)利用有效决策单元来定义生产可能集的前沿面,并使用输出变量与输入变量的加权和之比来度量相应决策单元的效率,因此不需要考虑投

收稿日期:2012-12-28; **修订日期**:2013-07-19

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(71101108)

作者简介:杜娟(1984-),女(汉族),安徽合肥人,同济大学经济与管理学院,博士,讲师,研究方向:数据包络分析、决策与优化、多目标决策系统.

入与产出之间的生产函数关系;(2)不需要预先估计任何参数或权重,投入与产出变量的权重通过求解相应的 DEA 模型而获得,因此结果比较客观,可以在很大程度上避免主观因素对于效率评价的影响。

正是由于上述优点,DEA 方法被广泛运用于各种行业的绩效评价与改进体系,包括教育[11]、医疗[12-14],体育[15-16]、银行[17]、保险[18]、商业机构[19-20]、连锁酒店[21]等等。

在现有研究中,虽然有不少学者以城市为样本,建立相关指标体系以评价城市的创新能力,但是往往是着眼于整体创新绩效,却并未关注城市创新过程的内部结构以及指标之间的相互联系。本文借鉴已有的创新评价指标体系,以数据的可获取性、可操作性以及少重复性为原则进行指标筛选,将创新过程分为人才培养和科技创新两个创新子阶段,其中人才输出培养阶段为后续的科技成果创造阶段提供了不可或缺的人力资源。因此,为了更加贴切地描述这样一个城市创新过程,我们考虑使用两阶段 DEA 模型进行绩效评价。在第一阶段——人才培养阶段,地方政府投入教育经费、政府属研究机构的研发人员,以及部分科技经费和全社会研发经费,输出以下三种产出——每万人在校大学生数、市级以上重点实验室和工程中心数、全社会研发人员全时当量,其中后两种产出作为人力资源投入与第一阶段余下未用的科技经费和研发经费(财政投入)在成果创造阶段创造了以下科技成果——年度授权专利数、认定登记的技术合同成交额、规模以上工业高新技术产值率、市级以上科技进步奖。这里需要特别指出的是,人才培养阶段(第一阶段)的两种产出(市级以上重点实验室和工程中心数、全社会研发人员全时当量)作为新的投入继续参与到科技创新阶段(第二阶段)的成果创造中,这样的第一阶段的产出被称为中间变量(intermediate measures)。另一方面,可以发现,科技经费和研发经费被同时使用于人才培养和科技创新,即为两个子阶段的共享投入资源。

共享投入资源这一特殊情况也曾经被一些学者在相关的 DEA 文献中分析过。以 Zhu[22] 对世界 500 强公司的研究为例。劳力和资产就是两个子阶段(利润创造阶段和市场推广阶段)的共享资源,即利润创造和市场推广的过程都使用了劳力和资产作为投入资源,而且这两种投入很难被进一步细分为更精确的子元素,以确定哪一部分仅与第一阶段或第二阶段有关。Cook 和 Hababou[23],以及 Cook 等[24]建立了针对共享投入资源的单阶段 DEA 模型,他们的模型并不要求具体确定共享投入在两个阶段的分配比例。

两阶段网络结构的 DEA 模型被广泛应用于各行各业,其中包括美国商业银行的市场推广能力和盈利能力研究[17],美国职业棒球大联盟比赛中各支球队的表现[25],医疗护理质量评价[26],以及台湾非人寿保险行业探究[18]等。

传统的基于 DEA 方法的两阶段生产结构的研究[22,24-25],往往是将标准的 DEA 模型直接应用于两个子阶段的效率评价,也没有考虑共享投入资源的问题。然而标准的 DEA 模型并不能解决由中间变量所引起的存在于两阶段之间的潜在冲突,因此不少学者[18,20,27]从各自不同的研究角度提出了解决这一问题的方法。虽然上述文献在两阶段 DEA 效率研究上都做出了一定的贡献,但是却没有将共享投入资源的特殊情况考虑进来。Chen Yao 等[28]率先研究了具有共享投入的两阶段 DEA 模型,并在台湾非人寿保险行业进行了应用。本文在前人的研究基础上,针对城市创新能力的应用背景,综合考虑了共享投入和分阶段产出对两阶段 DEA 模型的影响,对国内 52 座重点城市的创新能力进行了有效评价和区分,可以为这些城市进一步提高自身的科技创造和研发创新能力提供一定的参考价值和指导意义。

2 具有共享投入资源和分阶段产出的两阶段 DEA 模型

考虑如图 1 所示的两阶段生产过程,部分投入资源被两个子阶段所共同使用,同时第一阶段的部分产出作为投入继续参与第二阶段的运作过程。假设有 n 个决策单元,每个决策单元用 $DMU_j, j=1,\cdots,n$ 表示。DMU_j 在整个生产过程中拥有两类投入资源:一类用 $x_{i_1 j}, i_1 \in I_1$ 表示那些仅使用于第一阶段的投入;另一类则被两个子阶段所共享,记为 $x_{i_2 j}, i_2 \in I_2$。在第一阶段,DMU_j 制造 s_1 种产出 $y_{r_1 j}, r_1 \in O_1$ 直接从系统中输出,同时产生另外 t 种产出 $z_{dj}, d \in D$(中间变量)作为投入继续参与第二阶段的运作。第二阶段消耗这些中间变量和部分共享投入以制造最终产出 $y_{r_2 j}, r_2 \in O_2$。

由于投入 $i_2 \in I_2$ 为两个子阶段所共同使用,根据每个阶段对于共享投入使用的比例,我们将所有投入资源 $x_{i_2 j}, i_2 \in I_2$ 分成 $\alpha_{i_2 j} x_{i_2 j}$ 和 $(1-\alpha_{i_2 j}) x_{i_2 j}$ 两部分,分别代表第一和第二阶段对于投入 $i_2 \in I_2$ 的使用份额,其中 $\alpha_{i_2 j} \in [0,1]$ 是一个有待通过求解模型而确定的未知变量。类似于 Cook 和 Hababou[23]

图 1　两阶段过程

中的约束，所有 $\alpha_{i_2 j}(i_2 \in I_2, j=1,\cdots,n)$ 的取值将会根据实际情况和决策偏好被限制在一定的范围之内，即 $L_{i_2 j}^1 \leq \alpha_{i_2 j} \leq L_{i_2 j}^2$ 。

基于 Banker 等[29]提出的规模收益可变（variable returns to scale，VRS）模型，DMU_o 在第一和第二阶段的 VRS 效率值可以通过如下模型（1）和（2）分别求解：

$$
\max \frac{\sum_{r_1 \in O_1} u_{r_1} y_{r_1 o} + \sum_{d \in D} k_d^1 z_{do} + u^1}{\sum_{i_1 \in I_1} v_{i_1} x_{i_1 o} + \sum_{i_2 \in I_2} v_{i_2}^1 \alpha_{i_2 o} x_{i_2 o}}
$$

$$
\begin{aligned}
&s.\ t.\\
&\frac{\sum_{r_1 \in O_1} u_{r_1} y_{r_1 j} + \sum_{d \in D} k_d^1 z_{dj} + u^1}{\sum_{i_1 \in I_1} v_{i_1} x_{i_1 j} + \sum_{i_2 \in I_2} v_{i_2}^1 \alpha_{i_2 j} x_{i_2 j}} \leqslant 1, j=1,\cdots,n \qquad (1)\\
&L_{i_2 j}^1 \leqslant \alpha_{i_2 j} \leqslant L_{i_2 j}^2, i_2 \in I_2, j=1,\cdots,n\\
&v_{i_1}, v_{i_2}^1, u_{r_1}, k_d^1 \geqslant \varepsilon, i_1 \in I_1, i_2 \in I_2, r_1 \in O_1, d \in D\\
&u^1\ free
\end{aligned}
$$

$$
\max \frac{\sum_{r_2 \in O_2} u_{r_2} y_{r_2 o} + u^2}{\sum_{d \in D} k_d^2 z_{do} + \sum_{i_2 \in I_2} v_{i_2}^2 (1-\alpha_{i_2 o}) x_{i_2 o}}
$$

$$
\begin{aligned}
&s.\ t.\\
&\frac{\sum_{r_2 \in O_2} u_{r_2} y_{r_2 j} + u^2}{\sum_{d \in D} k_d^2 z_{dj} + \sum_{i_2 \in I_2} v_{i_2}^2 (1-\alpha_{i_2 j}) x_{i_2 j}} \leqslant 1, j=1,\cdots,n \qquad (2)\\
&L_{i_2 j}^1 \leqslant \alpha_{i_2 j} \leqslant L_{i_2 j}^2, i_2 \in I_2, j=1,\cdots,n\\
&v_{i_2}^2, u_{r_2}, k_d^2 \geqslant \varepsilon, i_2 \in I_2, r_2 \in O_2, d \in D\\
&u^2\ free
\end{aligned}
$$

注意到如果假设 $u^1 = u^2 = 0$，那么模型（1）和（2）就会转化成 Charnes 等[10]提出的规模收益不变（constant returns to scale，CRS）模型，故以下基于 VRS 假设的任何讨论均可以推广到 CRS 情况下。

不少研究[20,27]指出，将模型（1）和（2）分别单独运用于每个子阶段并不能够准确地对中间变量 z_{dj}，$d \in D$ 进行合理建模。一种可行的改进方法就是从整体角度来审视两阶段结构的效率评价，找到一组最优权重使得整个过程的总体效率实现最大化。

因此，我们采用类似前人的一些假设和做法[18,27-28,30]，在模型（1）和（2）中，对于同一种中间变量 $d \in D$ 和同一种投入 $i_2 \in I_2$，假设其在每个子阶段中的权重相等，即 $k_d^1 = k_d^2 = k_d$，$v_{i_2}^1 = v_{i_2}^2 = v_{i_2}$。

在上述假设下，两个子阶段的效率值可以按照如下加权平均的形式进行综合：

$$
w_1 \cdot \frac{\sum_{r_1 \in O_1} u_{r_1} y_{r_1 o} + \sum_{d \in D} k_d z_{do} + u^1}{\sum_{i_1 \in I_1} v_{i_1} x_{i_1 o} + \sum_{i_2 \in I_2} v_{i_2} \alpha_{i_2 o} x_{i_2 o}} + w_2 \cdot \frac{\sum_{r_2 \in O_2} u_{r_2} y_{r_2 o} + u^2}{\sum_{d \in D} k_d z_{do} + \sum_{i_2 \in I_2} v_{i_2} (1-\alpha_{i_2 o}) x_{i_2 o}} \qquad (3)
$$

其中，w_1 和 w_2 是用户指定的权重，满足 $w_1 + w_2 = 1$。

权重 w_1 和 w_2 代表了两个子阶段相对于整个生产过程的重要性或贡献程度，因而一种比较合理的权重选择可以是每个子阶段的投入资源相对于整体投入资源的比例，这一比例可以比较恰当地反映每个阶段相对生产规模的大小。具体用数学公式表示，有：

$$
\begin{aligned}
w_1 &= \frac{\sum_{i_1 \in I_1} v_{i_1} x_{i_1 o} + \sum_{i_2 \in I_2} v_{i_2} \alpha_{i_2 o} x_{i_2 o}}{\sum_{i_1 \in I_1} v_{i_1} x_{i_1 o} + \sum_{i_2 \in I_2} v_{i_2} x_{i_2 o} + \sum_{d \in D} k_d z_{do}}\\
w_2 &= \frac{\sum_{d \in D} k_d z_{do} + \sum_{i_2 \in I_2} v_{i_2} (1-\alpha_{i_2 o}) x_{i_2 o}}{\sum_{i_1 \in I_1} v_{i_1} x_{i_1 o} + \sum_{i_2 \in I_2} v_{i_2} x_{i_2 o} + \sum_{d \in D} k_d z_{do}}
\end{aligned} \qquad (4)
$$

其中，$\sum_{i_1 \in I_1} v_{i_1} x_{i_1 o} + \sum_{i_2 \in I_2} v_{i_2} x_{i_2 o} + \sum_{d \in D} k_d z_{do}$ 表示整个两阶段生产过程中消耗的投入总资源，而 $\sum_{i_1 \in I_1} v_{i_1} x_{i_1 o} + \sum_{i_2 \in I_2} v_{i_2} \alpha_{i_2 o} x_{i_2 o}$ 和 $\sum_{i_2 \in I_2} v_{i_2} (1-\alpha_{i_2 o}) x_{i_2 o} + \sum_{d \in D} k_d z_{do}$ 则分别代表第一和第二阶段所消耗的资源。上式中，权重本身并不是需要优化的变量，而是优化变量的函数。上述权重的选择不仅具备合理性，也可以有效简化加权平均后的总体效率（3），实现后续规划模型的等价线性化，得到全局最优解。

基于上述分析假设，DMU_o 的 VRS 总体效率

可以通过求解分式规划(5)来计算,其约束保证了每个子阶段的效率值都不会超过 1。

$$e_o^* = \max \frac{\sum_{r_1 \in O_1} u_{r_1} y_{r_1 o} + \sum_{d \in D} k_d z_{do} + \sum_{r_2 \in O_2} u_{r_2} y_{r_2 o} + u^1 + u^2}{\sum_{i_1 \in I_1} v_{i_1} x_{i_1 o} + \sum_{i_2 \in I_2} v_{i_2} x_{i_2 o} + \sum_{d \in D} k_d z_{do}}$$

s. t.

$$\frac{\sum_{r_1 \in O_1} u_{r_1} y_{r_1 j} + \sum_{d \in D} k_d z_{dj} + u^1}{\sum_{i_1 \in I_1} v_{i_1} x_{i_1 j} + \sum_{i_2 \in I_2} v_{i_2} \alpha_{i_2 j} x_{i_2 j}} \leqslant 1, j = 1, \cdots, n$$

$$\frac{\sum_{r_2 \in O_2} u_{r_2} y_{r_2 j} + u^2}{\sum_{d \in D} k_d z_{dj} + \sum_{i_2 \in I_2} v_{i_2} (1 - \alpha_{i_2 j}) x_{i_2 j}} \leqslant 1, j = 1, \cdots, n \tag{5}$$

$L_{i_2 j}^1 \leqslant \alpha_{i_2 j} \leqslant L_{i_2 j}^2, i_2 \in I_2, j = 1, \cdots, n$

$v_{i_1}, v_{i_2}, u_{r_1}, u_{r_2}, k_d \geqslant \varepsilon, i_1 \in I_1, i_2 \in I_2, r_1 \in O_1, r_2 \in O_2, d \in D$

u^1, u^2 *free*

经过 Charnes-Cooper 变换[31]和变量等价替换,分式规划(5)可以等价转化为线性规划(6):

$$e_o^* = \max \sum_{r_1 \in O_1} \mu_{r_1} y_{r_1 o} + \sum_{d \in D} \kappa_d z_{do} + \sum_{r_2 \in O_2} \mu_{r_2} y_{r_2 o} + \dot{u}^1 + \dot{u}^2$$

s. t.

$$\sum_{r_1 \in O_1} \mu_{r_1} y_{r_1 j} + \sum_{d \in D} \kappa_d z_{dj} + \dot{u}^1 \leqslant \sum_{i_1 \in I_1} \omega_{i_1} x_{i_1 j} + \sum_{i_2 \in I_2} \beta_{i_2 j} x_{i_2 j}, j = 1, \cdots, n$$

$$\sum_{r_2 \in O_2} \mu_{r_2} y_{r_2 j} + \dot{u}^2 \leqslant \sum_{d \in D} \kappa_d z_{dj} + \sum_{i_2 \in I_2} (\omega_{i_2} - \beta_{i_2 j}) x_{i_2 j}, j = 1, \cdots, n \tag{6}$$

$$\sum_{i_1 \in I_1} \omega_{i_1} x_{i_1 o} + \sum_{i_2 \in I_2} \omega_{i_2} x_{i_2 o} + \sum_{d \in D} \kappa_d z_{do} = 1$$

$\omega_{i_2} L_{i_2 j}^1 \leqslant \beta_{i_2 j} \leqslant \omega_{i_2} L_{i_2 j}^2, i_2 \in I_2, j = 1, \cdots, n$

$\omega_{i_1}, \omega_{i_2}, \mu_{r_1}, \mu_{r_2}, \kappa_d \geqslant \varepsilon, i_1 \in I_1, i_2 \in I_2, r_1 \in O_1, r_2 \in O_2, d \in D$

$\dot{u}^1, \dot{u}^2$ *free*

效率分解

通过求解模型(6)获得一组最优解,可以相应计算得到两个子阶段的效率值。然而模型(6)可能具有多个最优解,从而导致式(3)所定义的总体效率的分解不唯一。很多研究[18,27,30]采取保持总体效率最优前提下最大化某一子阶段效率值的方法来寻求唯一的效率分解。在本文应用中,我们发现上述方法仍然可能产生不唯一的效率值。因此我们在前人方法上进行一定改进,根据决策者的偏好先后最大化两个子阶段的效率表现。具体做法是在保持总体效率在最优水平 e_o^* 的前提下,优化第一(或者第二)阶段的效率值;然后在保证总体效率和优先阶段效率不变的条件下,最大化另一子阶段的效率评价。

假设第一阶段被赋予优先权,其最优效率为:

$$e_o^{11*} = \max \frac{\sum_{r_1 \in O_1} u_{r_1} y_{r_1 o} + \sum_{d \in D} k_d z_{do} + u^1}{\sum_{i_1 \in I_1} v_{i_1} x_{i_1 o} + \sum_{i_2 \in I_2} v_{i_2} \alpha_{i_2 o} x_{i_2 o}}$$

s. t.

$$\frac{\sum_{r_1 \in O_1} u_{r_1} y_{r_1 j} + \sum_{d \in D} k_d z_{dj} + u^1}{\sum_{i_1 \in I_1} v_{i_1} x_{i_1 j} + \sum_{i_2 \in I_2} v_{i_2} \alpha_{i_2 j} x_{i_2 j}} \leqslant 1, j = 1, \cdots, n \tag{7a}$$

$$\frac{\sum_{r_2 \in O_2} u_{r_2} y_{r_2 j} + u^2}{\sum_{d \in D} k_d z_{dj} + \sum_{i_2 \in I_2} v_{i_2} (1 - \alpha_{i_2 j}) x_{i_2 j}} \leqslant 1, j = 1, \cdots, n \tag{7b}$$

$$\frac{\sum_{r_1 \in O_1} u_{r_1} y_{r_1 o} + \sum_{d \in D} k_d z_{do} + \sum_{r_2 \in O_2} u_{r_2} y_{r_2 o} + u^1 + u^2}{\sum_{i_1 \in I_1} v_{i_1} x_{i_1 o} + \sum_{i_2 \in I_2} v_{i_2} x_{i_2 o} + \sum_{d \in D} k_d z_{do}} = e_o^* \tag{7c}$$

$$\frac{\sum_{r_1 \in O_1} u_{r_1} y_{r_1 o} + \sum_{d \in D} k_d z_{do} + u^1}{\sum_{i_1 \in I_1} v_{i_1} x_{i_1 o} + \sum_{i_2 \in I_2} v_{i_2} x_{i_2 o} + \sum_{d \in D} k_d z_{do}} \geqslant 0 \tag{7d}$$

$$\frac{\sum_{r_2 \in O_2} u_{r_2} y_{r_2 o} + u^2}{\sum_{i_1 \in I_1} v_{i_1} x_{i_1 o} + \sum_{i_2 \in I_2} v_{i_2} x_{i_2 o} + \sum_{d \in D} k_d z_{do}} \geqslant 0 \tag{7e}$$

$L_{i_2 j}^1 \leqslant \alpha_{i_2 j} \leqslant L_{i_2 j}^2, i_2 \in I_2, j = 1, \cdots, n$

$v_{i_1}, v_{i_2}, u_{r_1}, u_{r_2}, k_d \geqslant \varepsilon, i_1 \in I_1, i_2 \in I_2, r_1 \in O_1, r_2 \in O_2, d \in D$

u^1, u^2 *free*

模型(7)中,约束(7a)和(7b)限制了两个子阶段的效率值均不超过 1;约束(7d)和(7e)保证每个子阶段具有非负的加权效率值;而约束(7c)则保证总体效率维持在最优值 e_o^*。

类似于模型(5),分式规划(7)也可以等价线性化。

基于最优总体效率 e_o^* 和最优第一阶段效率 e_o^{11*},第二阶段效率由下述线性规划(8)实现最优化。

$$e_o^{12*} = \max \sum_{r_2 \in O_2} \mu_{r_2} y_{r_2 o} + \dot{u}^2$$

s. t.

$$\sum_{r_1\in O_1}\mu_{r_1}y_{r_1j}+\sum_{d\in D}\kappa_d z_{dj}+\hat{u}^1\le\sum_{i_1\in I_1}\omega_{i_1}x_{i_1j}+\sum_{i_2\in I_2}\beta_{i_2j}x_{i_2j},j=1,\cdots,n$$

$$\sum_{r_2\in O_2}\mu_{r_2}y_{r_2j}+\hat{u}^2\leqslant\sum_{d\in D}\kappa_d z_{dj}+\sum_{i_2\in I_2}(\omega_{i_2}-\beta_{i_2j})x_{i_2j},j=1,\cdots,n$$

$$\sum_{r_1\in O_1}\mu_{r_1}y_{r_1o}+(1-e_o^*)\sum_{d\in D}\kappa_d z_{do}+\sum_{r_2\in O_2}\mu_{r_2}y_{r_2o}+\hat{u}^1+\hat{u}^2=e_o^*(\sum_{i_1\in I_1}\omega_{i_1}x_{i_1o}+\sum_{i_2\in O_2}\omega_{i_2}x_{i_2o})$$

$$\sum_{r_1\in O_1}\mu_{r_1}y_{r_1o}+\sum_{d\in D}\kappa_d z_{do}+\hat{u}^1=e_o^{11*}(\sum_{i_1\in I_1}\omega_{i_1}x_{i_1o}+\sum_{i_2\in I_2}\beta_{i_2o}x_{i_2o})\tag{8}$$

$$\sum_{d\in D}\kappa_d z_{do}+\sum_{i_2\in I_2}(\omega_{i_2}-\beta_{i_2o})x_{i_2o}=1$$

$$\omega_{i_2}L_{i_2j}^1\leqslant\beta_{i_2j}\leqslant\omega_{i_2}L_{i_2j}^2,i_2\in I_2,j=1,\cdots,n$$

$$\omega_{i_1},\omega_{i_2},\mu_{r_1},\mu_{r_2},\kappa_d\geqslant\varepsilon,i_1\in I_1,i_2\in I_2,r_1\in O_1,r_2\in O_2,d\in D$$

$$\hat{u}^1,\hat{u}^2\ free$$

令 $\{\beta_{i_2j}^*;\omega_{i_1}^*,\omega_{i_2}^*,\mu_{r_1}^*,\mu_{r_2}^*,\kappa_d^*,i_1\in I_1,i_2\in I_2,r_1\in O_1,r_2\in O_2,d\in D;\hat{u}^{1*},\hat{u}^{2*}\}$ 代表模型(8)的一组最优解。两个子阶段的最优效率值分别为 e_o^{11*}(阶段 1)和 e_o^{12*}(阶段 2),最优权重分别计算为:

$$w_1^*=\frac{\sum_{i_1\in I_1}\omega_{i_1}^*x_{i_1o}+\sum_{i_2\in I_2}\beta_{i_2o}^*x_{i_2o}}{\sum_{i_1\in I_1}\omega_{i_1}^*x_{i_1o}+\sum_{i_2\in I_2}\omega_{i_2}^*x_{i_2o}+\sum_{d\in D}\kappa_d^*z_{do}}$$

$$w_2^*=\frac{\sum_{d\in D}\kappa_d^*z_{do}+\sum_{i_2\in I_2}(\omega_{i_2}^*-\beta_{i_2o}^*)x_{i_2o}}{\sum_{i_1\in I_1}\omega_{i_1}^*x_{i_1o}+\sum_{i_2\in I_2}\omega_{i_2}^*x_{i_2o}+\sum_{d\in D}\kappa_d^*z_{do}}$$

由于 $\sum_{d\in D}\kappa_d^*z_{do}+\sum_{i_2\in I_2}(\omega_{i_2}^*-\beta_{i_2o}^*)x_{i_2o}=1$,故 w_1^* 和 w_2^* 可以分别简化为 $w_1^*=1-w_2^*$ 和 $w_2^*=\frac{1}{\sum_{i_1\in I_1}\omega_{i_1}^*x_{i_1o}+\sum_{i_2\in I_2}\omega_{i_2}^*x_{i_2o}+\sum_{d\in D}\kappa_d^*z_{do}}$。

对于最优权重,我们并没有效仿 Chen Yao 等[30]的做法直接通过求解总体效率模型(6)的最优解来计算,而是由阶段效率模型(8)来获得。采用该种做法的原因主要包括:(i)模型(6)可能拥有多个最优解,从而导致多组最优权重组合;(ii)模型(8)可以同时实现最优的总体效率和阶段效率,因而相对应的权重结果更为合理。

与模型(7)和(8)类似,可以获得在不影响总体效率 e_o^* 的前提下第二阶段的最优效率值 e_o^{22*} 、满足 e_o^* 和 e_o^{22*} 的第一阶段最优效率 e_o^{21*} 、以及相应的最优权重。

如果阶段效率结果满足 $e_o^{11*}=e_o^{21*}$ 或者 $e_o^{22*}=e_o^{12*}$,那么以下结论成立:效率分解是唯一的。

3　城市创新能力评价应用

针对国内重点城市创新能力的评价问题,对于初选的指标体系进行一定程度上的筛选,剔除部分可获取性差、信息分辨能力不强、信息重复程度高的指标,最终形成 11 项评价指标,分别作为投入、产出或者中间变量分布于人才培养和科技创新两个创新子阶段。在第一阶段——人才培养阶段,地方政府投入教育经费、政府属研究机构的研发人员,以及部分科技经费和全社会研发经费,制造以下三种产出——每万人在校大学生数、市级以上重点实验室和工程中心数、全社会研发人员全时当量,其中后两种产出作为人力资源投入(中间变量)与第一阶段余下未用的科技经费和研发经费(财政投入)在成果创造阶段创造了以下科技成果——年度授权专利数、认定登记的技术合同成交额、规模以上工业高新技术产值率、市级以上科技进步奖。以上两阶段过程可以由下图 2 来描述:

图 2　城市创新能力评价体系

表 1 总体效率与效率分解结果

城市	总体效率 e^*	优先优化阶段 1		优先优化阶段 2	
		阶段 1 e^{11*}	阶段 2 e^{12*}	阶段 1 e^{21*}	阶段 2 e^{22*}
石家庄	0.9015	1	0.8686	0.7706	1
秦皇岛	1	1	1	1	1
太原	0.6015	0.7480	0.3563	0.6037	0.5938
呼和浩特	1	1	1	1	1
沈阳	0.8974	1	0.8657	0.7060	1
大连	1	1	1	1	1
长春	1	1	1	1	1
哈尔滨	0.8841	1	0.8313	0.8237	0.9210
南京	1	1	1	1	1
无锡	0.8464	1	0.7354	0.8566	0.8367
常州	1	1	1	1	1
苏州	1	1	1	1	1
南通	0.9600	1	0.9250	0.9208	1
扬州	0.8536	0.9374	0.7476	0.7816	1
镇江	1	1	1	1	1
泰州	1	1	1	1	1
杭州	0.8277	1	0.6632	0.9091	0.7329
宁波	0.9742	1	0.9579	1	0.9579
温州	1	1	1	1	1
嘉兴	0.7886	0.9592	0.6076	0.7108	1
湖州	0.7436	0.9444	0.4738	0.7389	0.7566
绍兴	0.9619	0.9753	0.9549	0.8982	1
金华	0.7639	0.9950	0.5003	0.8257	0.6530
舟山	1	1	1	1	1
台州	0.9078	1	0.8646	0.7757	1
合肥	0.6926	0.7313	0.6615	0.5637	0.8758
福州	0.9059	1	0.7887	0.8664	0.9806
厦门	0.7011	0.7504	0.5272	0.6993	0.7100
南昌	0.7838	0.9560	0.4239	0.7933	0.7418
济南	1	1	1	1	1
青岛	0.8299	0.8992	0.7701	0.7104	1
郑州	0.8819	1	0.8234	0.7816	0.9558
洛阳	0.6886	0.7994	0.4753	0.6629	0.7876
武汉	1	1	1	1	1
长沙	0.8064	0.8989	0.7153	0.6973	1
广州	1	1	1	1	1
深圳	1	1	1	1	1
珠海	1	1	1	1	1
汕头	1	1	1	1	1
东莞	1	1	1	1	1
南宁	1	1	1	1	1
柳州	0.8829	1	0.6600	0.8677	0.9301
海口	0.8794	1	0.7885	0.7829	1
成都	1	1	1	1	1
贵阳	0.5643	0.6990	0.3627	0.5803	0.5226
昆明	0.6358	0.7484	0.5422	0.5733	0.7306
拉萨	0.4868	0.6391	0.3931	0.4687	0.5063
西安	1	1	1	1	1
兰州	0.9004	1	0.8168	0.8328	1
西宁	0.5855	0.7709	0.4306	0.6016	0.5631
银川	0.6826	0.7605	0.5603	0.6300	0.8307
乌鲁木齐	1	1	1	1	1

假设两种共享投入——地方财政科技经费投入占 GDP 比重及全社会研发投入占 GDP 比重，在第一阶段的分配比例分别满足：$0.3 \leqslant \alpha_1 \leqslant 0.6$，$0.2 \leqslant \alpha_2 \leqslant 0.4$。相应地，这两种共享投入在第二阶段的分配比例为 $(1-\alpha_1)$ 和 $(1-\alpha_2)$。

表 1 展示了在 VRS 假设下，每座城市的创新总体效率以及分别优先优化第一或第二阶段效率值而得到的子阶段效率分解结果。

从整体效率角度分析，52 座城市中有 22 座拥有相对有效的创新能力，从地理位置来看，这些城市主要分布于长三角和珠三角区域，以及东北和西部的小部分城市。另一方面，创新效率相对较低的城市主要集中于中部、西南和西北的部分地区。这与我国当前各地域的实际发展现状是基本吻合的。比如，包括南京、常州、苏州、镇江、泰州、温州、和舟山在内的长三角区域，以及包括广州、深圳、珠海、汕头、东莞在内的珠三角区域均处于经济发达的东部沿海地区，民营经济相当发达，市场化程度高，支持科技发展的综合环境和配套机制相对比较完善，因此创新绩效显著；西安、武汉、成都虽然地处中西部地区，但分别是西北、中部和西南区的中心城市，依托本地众多知名院校的智力支持，能够有效地聚集并整合各类科技资源；大连、长春、呼和浩特等地位于老工业基地，科技资源丰富，工业基础也比较雄厚，再加之周边知名高校和科研院所的技术支持和人才培育，仍然具有出色的创新能力。另一方面，西宁、拉萨、昆明、贵阳、太原等城市均处于经济欠发达的西北和西南地区，经济发展和市场化程度都比较落后，来自周边地区的高新技术产业和高校技术转化的支持匮乏，创新的软件和硬件环境尚不够成熟，因此这些城市的创新效率都在较低水平（<0.65）。

将表 1 中两个子阶段下的效率分解结果进行比对，可以发现，无论在何种优先级别下，以下 12 座城市的任一创新子阶段都是非有效的：太原、湖州、金华、厦门、南昌、合肥、洛阳、贵阳、昆明、拉萨、西宁、银川。上述城市主要分布于经济发展水平相对落后的中西部地区，缺乏来自周边地区的经济支撑和技术支持，高新技术产业的发展起步较晚，创新环境尚有待完善。但是值得注意的是，也存在来自发达地区的城市，比如湖州、金华和厦门。对比在两种优先级别下的单阶段效率结果，不难发现，这三座城市主要是在第二阶段（科技创新）的表现不尽人意，具体反映在产出指标所代表的四项科技成果中的至少某一项上相对落后。这可能与科技积累较薄弱、科技资源相对匮乏、缺乏来自知名理工类院校的技术支持和成果转化、高新技术的产业化程度有待提高等因素相关。

在所有考察城市中，有 23 座城市在创新能力上具有唯一的效率分解，其中除了宁波以外，其余 22 座城市均为整体效率相对有效的城市。

4　结语

针对中国 52 座重点城市的创新能力建立了评价体系，包括人才培养与科技创新两个创新阶段，其中人才输出培养阶段为后续的科技成果创造阶段提供了不可或缺的人力资源。对于上述城市创新过程的效率评价，提出综合考虑共享投入和分阶段产出的两阶段 DEA 模型，不仅对国内重点城市的创新能力进行了区分，也为这些城市正确客观地认识自身的人才培养机制和科技创造能力提供了重要的决策参考依据，有利于有针对性地提高创新绩效。

在本文的评价体系下，每座城市的综合创新能力是优先最大化的，其次才是每个创新子阶段的绩效评价。然而，在某些特殊实际应用中，当某个子阶段具有凌驾于整体过程的绝对优先权时，不妨考虑采用 Liang 等[27] 提出的 leader-follower 模型，将具有绝对优先权的子阶段看作是领导者（leader），而将另一子阶段看作是追随者（follower）。

参考文献：

[1] 张微，夏恩君，王月红. 城市技术创新环境建设研究 [J]. 商业时代，2007，28：4－5.

[2] 邵云飞，唐小我. 中国区域技术创新能力的主成分实证研究 [J]. 管理工程学报，2005，19(3)：71－76.

[3] 张立柱，郭中华，李玉珍. 山东省城市创新能力评价及“四大创新圈模式”构建 [J]. 科学学与科学技术管理，2006，6：75－79.

[4] 刘友金，李洪铭，叶俊杰. 基于聚类分析的区域创新能力差异研究 [J]. 哈尔滨学院学报，2001，22(2)：24－29.

[5] 李晓钟，张小蒂. 江浙区域技术创新效率比较分析 [J]. 中国工业经济，2005，7(7)：57－64.

[6] 曹杨，王雪青. 基于耗散结构理论的资源型城市创新能力评价 [J]. 东北大学学报(社会科学版)，2011，13(2)：124－127.

[7] 邵云飞，周敏，唐小我. 基于中心城市创新辐射的西部自主创新效率研究 [J]. 管理学报，2010，7(12)：1825－1830.

[8] 池仁勇，虞晓芬，李正卫. 我国东西部地区技术创新效率

差异及其动因分析 [J]. 中国软科学,2004, 8: 45－52.

[9] 代明,张晓鹏. 基于 DEA 的中国创新型城市创新绩效分析 [J]. 科技管理研究,2011,6: 6－8.

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

[11] Sarrico C S, Dyson R G. Using DEA for planning in UK university—An institutional perspective [J]. Journal of Operational Research Society, 2000, 51(7): 789－800.

[12] Sherman H D. Hospital efficiency measurement and evaluation: Empirical test of a new technique [J]. Medical Care, 1984, 22(10): 922－938.

[13] O'Neill L. Multifactor efficiency in data envelopment analysis with an application to urban hospitals [J]. Health Care Management Science, 1998, 1(1): 19－27.

[14] Harris J M, Ozgen H, Ozcan Y A. Do mergers enhance the performance of hospital efficiency [J]? Journal of the Operational Research Society, 2000, 51(7): 801－811.

[15] Lozano S, Villa G, Guerrero F, et al. Measuring the performance of nations at the Summer Olympics using data envelopment analysis [J]. Journal of the Operational Research Society, 2002, 53(5): 501－511.

[16] Churilov L, Flitaman A. Towards fair ranking of Olympics achievements: The case of Sydney 2000 [J]. Computers and Operations Research, 2006, 33(7): 2057－2982.

[17] Seiford L M, Zhu J. Profitability and marketability of the top 55 US commercial banks [J]. Management Science, 1999, 45(9): 1270－1288.

[18] 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.

[19] Wang C H, Gopal R, Zionts S. Use of data envelopment analysis in assessing information technology impact on firm performance [J]. Annals of Operations Research, 1997, 73: 191－213.

[20] Chen Yao, Zhu J. Measuring information technology's indirect impact on firm performance [J]. Information Technology & Management Journal, 2004, 5(1－2): 9－22.

[21] Botti L, Briec W, Cliquet G. Plural forms versus franchise and company-owned systems: A DEA approach of hotel chain performance [J]. Omega, 2009, 37(3): 566－578.

[22] Zhu J. Multi-factor performance measure model with an application to Fortune 500 companies [J]. European Journal of Operational Research, 2000, 123(1): 105－124.

[23] Cook W D, Hababou M. Sales performance measurement in bank branches [J]. Omega, 2001, 29(4): 299－307.

[24] Cook W D, Hababou M, Tuenter H. Multicomponent efficiency measurement and shared inputs in data envelopment analysis: An application to sales and service performance in bank branches [J]. Journal of Productivity Analysis, 2000, 14(3): 209－224.

[25] Sexton T R, Lewis H F. Two-stage DEA: An application to major league baseball [J]. Journal of Productivity Analysis, 2003, 19(2－3): 227－249.

[26] Chilingerian J, Sherman H D. Health care applications: From hospitals to physician, from productive efficiency to quality frontiers[M]//Cooper W W, Seiford L M, Zhu J. Handbook on data envelopment analysis. Boston: Springer, 2004.

[27] Liang L, Cook W D, Zhu J. DEA models for two-stage processes: Game approach and efficiency decomposition [J]. Naval Research Logistics, 2008, 55: 643－653.

[28] Chen Yao, Du Juan, Sherman H D, et al. DEA model with shared resources and efficiency decomposition [J]. European Journal of Operational Research, 2010, 207(1): 339－349.

[29] Banker R D, Charnes A, Cooper W W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis [J]. Management Science, 1984, 30(9): 1078－1092.

[30] Chen Yao, Cook W D, Li Ning, et al. Additive efficiency decomposition in two-stage DEA [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 196(3): 1170－1176.

[31] Charnes A, Cooper W W. Programming with linear fractional functionals [J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1962, 9(3－4):181－186.

DEA-based Evaluation on City Innovation in China

DU Juan, HUO Jia-zhen

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

Abstract: According to the background of application to city innovation performance, a set of indices are established for evaluating innovation performance of key cities in China. The innovation process is divided into two individual stages——talent training and sci-tech creation. Two-stage data envelopment analysis (DEA) models are proposed to assess and differentiate the overall and individual-stage innovation performance for 52 Chinese key cities. It is demonstrated that the Yangtze River Delta region and Pearl River Delta region have done an excellent job in city innovation, while quite a number of cities in central, southeast and northeast China still have a lot to improve in that aspect. The results provide important implications and suggestions for those cities to effectively enhance their innovative development.

Key words: data envelopment analysis (DEA); efficiency; two-stage; city innovation performance