

Water Use Efficiency Assessment of Chinese Provinces Based on a Data Envelopment Analysis Model with Undesirable Outputs

Xuteng Zhang¹, Jingjie Yu^{2,3}

¹Tsinghua University, Beijing

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing

³Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing
Email: zhangxt13@mails.tsinghua.edu.cn

Received: Mar. 24th, 2017; accepted: Apr. 11th, 2017; published: Apr. 14th, 2017

Abstract

Water use efficiency is the core issue of sustainable water resources management, which needs to be properly assessment. This paper uses the data envelopment analysis (DEA) theory and builds a super DEA model with undesirable outputs by choosing indicators including both the desirable outputs (the direct economic value) and the undesirable outputs (the sewage and pollution). Using this model, we calculated the water use efficiency at provincial level in China during 1998-2012, and calculated the difference between the actual indicators and the indicators when the efficiency is the best with the method of projection analysis. The results indicate that the water use efficiency is relatively high in 13 provinces, such as Beijing and Tianjin; and the efficiency is relatively low in 5 provinces such as Guangdong and Guangxi. The efficiency in most of the provinces is affected by the sewage which will be raised if the sewage amount decreases. In addition, projection analysis result provides the basis for efficiency improvement by means of indicators adjustment.

Keywords

Data Envelopment Analysis, Super DEA Model with Undesirable Outputs, Water Use Efficiency, Projection Analysis, Sustainable Water Resources Management

基于非期望输出DEA模型的各省用水效率评价

张旭腾¹, 于静洁^{2,3}

¹清华大学, 北京

²中国科学院大学, 北京

作者简介: 张旭腾, 清华大学水利水电工程系 2013 级本科生, 2015 年参加中国科学院大学生创新实践训练计划项目。

³中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京
Email: zhangxt13@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2017年3月24日; 录用日期: 2017年4月11日; 发布日期: 2017年4月14日

摘要

用水效率是水资源利用的核心, 科学评价用水效率对提高区域可持续水资源管理具有重要的指导意义。本文应用数据包络分析(DEA)理论, 基于用水的期望输出(直接经济价值)和非期望输出(污水排放污染环境)双重视角选择评价指标, 构建了具有非期望输出的超效率DEA模型, 对用水效率进行更为合理的评价。利用该模型, 对1998~2012年全国各省逐年的用水效率进行计算, 结果显示, 北京、天津等13个省份用水效率水平较高; 广东、广西等5个省份用水效率水平较低。分析表明, 多数省份用水效率值及其相对高低受污水排放的影响, 减少排放可提高效率。此外, 通过投影分析, 确定当前与效率最优状态下各指标之间的差距, 为各指标的合理调整提供依据。本文研究结果通过文献调研得以印证, 可对用水效率的评价和提高提供合理指导。

关键词

数据包络分析, 非期望输出超效率DEA模型, 用水效率, 投影分析, 可持续水资源管理

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水资源是国家经济社会可持续发展的基础性和战略性自然资源, 具有不可替代的作用。随着人口增长和经济发展, 水资源的需求量不断增加[1], 如何综合评价一个地区的用水效率并据此合理配置水资源, 成为水资源利用的核心问题。当前, 水资源利用效率较为主流的评价方法为指标体系评价方法和数据包络分析 CCR 模型法。其中, 指标体系评价方法依据指标间前后、左右关系理清体系的结构, 采用较为系统、全面的体系, 能够定量反映和衡量水资源利用有效性状况, 并综合评价区域水资源利用效率[2], 但合理确定指标的权重难度较高, 且不同地区之间难以进行比较[3]。关于赋权方法, 国内常用的层次分析法、德尔菲法等主观性较强, 研究结果不够客观[2]。数据包络分析方法(简称 DEA), 是美国运筹学家 A. Charnes 和 W.W. Cooper 等学者在“相对效率评价”概念基础上发展起来的一种新的系统分析方法[4]。该方法使用数学规划, 评价具有多个输入和输出的“部门”或“单位”(称为决策单元, decisionmakingunit, DMU)间的相对有效性(称为 DEA 有效), 常用模型包括 CCR 模型(Charnes, Cooper 和 Rhodes 提出的应用于前沿面估算的非参数数学规划的数据包络分析方法)、BCC 模型(Banker, Charnes 和 Cooper 提出的可变规模收益模式下数据包络分析技术)以及 CCW 模型(Charnes, Cooper 和 Wei 提出的计算无穷多个决策单元效率的模型)等[5]。通过选取合理的指标, 利用数据包络分析计算区域用水效率, 无需主观赋权和无量纲化处理, 能够客观、全面地评价区域综合用水效率, 并进行区域之间用水效率高低的比较[6]。数据包络分析方法简单易用, 适用于对多个区域的用水效率进行评价和比较。JW Norton 等应用数据包络分析方法, 计算并分析不同产权模式、不同供水模式下的用水效率, 表明公共设施供水最为有效, 且地下水用水效率优于地表水[7]; 伍晓涛等基于数据包络分析方法, 利用 CCR 模型, 对太湖流域 2000 年~2010 年用水效率进行评价, 结果表明太湖流域用水效率呈徘徊上升趋势, 且废水排放较大会导致用水效率值偏低[8]; 吉亚辉等应用 CCR 模型, 评价了兰州市 2000 年~2008 年的用水效率, 结果表明, 投入冗余、尤其是农业用水投入过多直接影响水资源有效

利用[9]; 王莹利用投入导向型的超效率 DEA 模型, 对 2012 年全国各省水资源利用效率进行计算和分析, 结果表明, 我国水资源利用整体效率不高, 东部、中部、西部效率差异很大, 东部水资源平均利用效率远高于中部和西部地区[10]; 董占峰等应用数据包络分析方法, 对 2010 年全国各省用水效率进行评价, 通过效率分解和投影分析, 表明我国农业方面节水潜力最大[11]; 赵良仕测算水足迹作为各省真实用水量, 构建在固定规模报酬下考虑非期望产出的 SBM 模型, 结果表明, 总体上东部沿海省市的水资源利用效率高于中西部不发达地区内陆地区[12]。

现有研究大多利用 CCR 模型进行效率计算, 以区域水资源消耗和用水产生的经济价值作为计算指标。由于当前研究所选取的指标体系中常常缺少生态环境相关指标, 且所用的数据包络分析计算模型较少将生态环境问题考虑在内, 使评价结果常常忽视环境影响。在实际用水过程中, 污水排放会造成环境污染问题, 影响水质并带来不可忽视的经济损失; 除此之外, 水污染会造成严重的缺水问题[13]。鉴于实际用水过程中的污水排放带来的负面经济效应和水量损失, 势必对用水效率产生一定的负面影响, 但当前多数研究未将其考虑在内; 而考虑到环境问题而建立的模型过于复杂[14] [15] [16]。除此之外, 利用 CCR 模型进行分析, 当有多个省份用水效率值为 1.0 即达到 DEA 有效时, 无法比较和评价这些效率最优省份的用水效率水平。

鉴于数据包络分析方法优势与当前模型存在的不足, 本文从用水的期望输出(直接经济价值)和非期望输出(污水排放污染环境)两方面选择评价指标, 构建了具有非期望输出的超效率 DEA 模型, 并利用该模型计算了 1998~2012 年全国各省逐年的用水效率, 还利用投影分析计算确定了当前与效率最优条件下各指标之间的差距。

本文从指标选取和模型构造两个方面, 确保在对各省水资源利用效率进行评价时, 能够将环境问题对用水效率的影响考虑在内, 并且应用超效率的思想, 对各省用水效率的相对高低进行准确评价。通过本文研究, 为提高可持续水资源管理水平提供科学依据。

2. 数据包络分析方法与模型

2.1. CCR 模型及超效率 CCR 模型

2.1.1. CCR 模型

假设有 n 个具有可比性的决策单元(DMU), 每个决策单元有 m 种资源的消耗(投入), 从而获得 s 种成效(产出)。 x_{ij} 和 y_{ij} 分别表示第 j 个决策单元的第 i 项投入和产出, 均由历史资料或统计资料得到。对于权系数 $v \in E^m$ 和 $u \in E^s$, 可将第 j 个决策单元的效率评价指数定义为 $h_j = \frac{u^T Y_j}{v^T X_j}$, 总可以适当选取系数 v 和 u , 使得 $h_j \leq 1$ 。

考察 DMU_0 的效率评价问题, 设目标函数为其效率评价指数 $h_{j_0} = \frac{u^T Y_0}{v^T X_0}$, 约束条件为所有决策单元的效率评价指数 $h_j = \frac{u^T Y_j}{v^T X_j} \leq 1$, 令 $t = \frac{1}{v^T X_0}$, $w = tv$, $\mu = tu$, 最终, 该规划问题转化为 CCR 模型:

$$\begin{aligned} & \max u^T Y_0 \\ & s.t. \begin{cases} w^T X_j - \mu^T Y_j \geq 0, j = 1, \dots, n \\ w^T X_0 = 1 \\ w \geq 0, \mu \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

该模型存在如下定义: 若模型最优值为 1, 则称 DMU_0 为弱 DEA 有效; 若线性规划存在最优解, 满足 $w^0 > 0, \mu^0 > 0$, 并且最优值均为 1, 则称 DMU_0 为 DEA 有效。

2.1.2. 超效率 CCR 模型

超效率 DEA 模型与 CCR 模型的区别在于, 在超效率模型的生产可能集中, 不包括所评价的决策单元本身,

因此, 该模型计算得到的效率值可能大于 1。在 CCR 模型计算结果中存在多个 DEA 有效单元时, 仍可通过超效率模型的计算结果进行评价, 得到其效率值的相对高低[17]。

超效率 DEA 模型如下:

$$\begin{aligned} & \min \theta \\ & s.t. \begin{cases} \sum_{(j=1, j \neq j_0)}^n \lambda_j Y_j \geq Y_{j_0} \\ \sum_{(j=1, j \neq j_0)}^n \lambda_j X_j \leq \theta X_{j_0} \\ \lambda_j \geq 0, j = 1, \dots, n \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

2.2. 具有非期望输出的超效率 DEA 模型

用水过程中, 会产生环境污染问题, 在有些地区已经达到不可忽视的程度, 对水资源高效利用造成不利影响。因此, 有必要将环境问题视为非期望输出, 构造具有非期望输出的超效率 DEA 模型, 从而更加准确地进行用水效率分析。

DEA 模型的本意是使产出和输入的比值达到最大。非期望输出影响所选取指标的两个方面, 包括: 1) 非期望输出会带来经济损失; 2) 非期望输出会影响可用水量, 即减少可用的资源量。因此, 考虑将以下分式最大化:

$$w = \frac{u^T Y - a^T Z}{v^T X + r^T Z} \quad (3)$$

式中: Y 为期望输出, Z 为非期望输出, X 为投入, 根据 DEA 模型的初始定义, 总可以找到适当的 u, a, v, r , 使得 $w \leq 1$ 。

构造具有非期望输出的超效率 DEA 模型如下:

$$\begin{aligned} & \max \frac{u^T Y_{j_0} - a^T Z_{j_0}}{v^T X_{j_0} + r^T Z_{j_0}} \\ & s.t. \begin{cases} \frac{u^T Y_j - a^T Z_j}{v^T X_j + r^T Z_j} \leq 1, j = 1, \dots, n, j \neq j_0 \\ r^T e + a^T \bar{e} - u^T \bar{e} \leq 0 \\ u, a \geq 0 \\ v, r \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $X_{j_0}, Y_{j_0}, Z_{j_0}$ 分别为输入、期望输出、非期望输出矩阵的第 j_0 列, 代表第 j_0 个生产单元的输入、期望输出和非期望输出。 u, a, v, r 均为系数, e 为对应于系数向量维度的单位向量。

对(5)式进行 CC 变换, 得到对偶 DEA 模型如下:

$$\begin{aligned} & \min w' = \theta \\ & s.t. \begin{cases} \sum_{(j=1, j \neq j_0)}^n \lambda_j Y_j - \beta \bar{e} \geq Y_{j_0} \\ \sum_{(j=1, j \neq j_0)}^n \lambda_j X_j \leq \theta X_{j_0} \\ \sum_{(j=1, j \neq j_0)}^n \lambda_j Z_j - \beta e \leq \theta Z_{j_0} \\ \lambda \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

2.3. 决策单元在(弱)有效面上的投影

如果第 j_0 个决策单元 DMU- j_0 不为(弱)DEA 有效, 可以用投影的方法对决策单元的投入和产出进行调整, 使其成为(弱)DEA 有效[18]。

对于本文构造的“考虑非期望输出的超效率 DEA 模型”而言, 定义下式

$$\begin{cases} \hat{X}_0 = \theta^0 X_0 - s^{X0-} \\ \hat{Y}_0 = Y_0 + s^{0+} \\ \hat{Z}_0 = \theta^0 Z_0 - s^{Z0-} \end{cases} \quad (6)$$

为 DMU- j_0 在有效面上的投影。

3. 指标选取和数据来源

本文研究区域为全国各省、直辖市、自治区(不含港澳台), 应用本文提出的具有非期望输出的 DEA 模型, 评价其用水效率。

模型所选取的用水指标包括投入数据、产出数据和非期望输出数据。其中, 投入数据包括降水量(亿 m^3)、水资源总量(亿 m^3)、农业用水(亿 m^3)、工业用水(亿 m^3)、生活用水(亿 m^3)和环境用水(亿 m^3); 期望输出数据包括一产产值(亿元)、二产产值(亿元)、三产产值(亿元)和人均 GDP(元); 非期望输出数据包括废水排放总量(万吨)、COD 排放量(万吨)和氨氮排放量(万吨)三个污染指标。

本研究所用的数据资料均来源于我国各年度水资源公报与统计年鉴。由于 2004~2012 年水资源公报与统计年鉴中未包括西藏自治区环境用水量, 因此, 未对这些年份西藏用水效率进行计算, 后续分析中均不含西藏自治区。

4. 结果及讨论

4.1. 具有非期望输出的超效率 DEA 模型计算结果及聚类分析

应用本文构造的具有非期望输出的超效率 DEA 模型进行计算, 得到各个省份 1998-2012 年用水效率, 结果如下表所示。

在 DEA 理论中, 决策单元是否为 DEA 有效的评价标准为效率值是否达到 1。应用该标准, 可对各个省份用水效率水平进行分析。由表 1 可知, 多数年份(多于 50%)用水效率值超过 1 的省份共有 13 个, 包括: 北京、天津、河北、内蒙古、上海、山东、河南、湖北、海南、重庆、四川、青海和宁夏, 这些省份水资源利用效率处于较高水平; 所有年份用水效率值均未达到 1 的省份共有 5 个, 包括: 浙江、江西、湖南、广西和广东, 这些省份用水效率处于较低水平; 少数年份用水效率超过 1 或接近 1 的省份共有 12 个, 包括: 山西、辽宁、吉林、黑龙江、江苏、福建、四川、贵州、云南、陕西、甘肃和新疆, 这些省份用水效率处于中间水平, 且在计算年份中超过半数年份未达到 DEA 有效。

总体而言, 东部发达地区的用水效率处于较高水平, 中部地区和西部地区用水效率偏低, 与以往研究结果相符[10] [11] [12]。但考虑到污染排放情况, 青海和宁夏等地区污水排放量小, 故用水效率较高; 而广东、浙江等地区污水排放量大, 故用水效率较低。

鉴于表 1 中数据较多, 采用聚类法寻找典型年份数据。应用 MATLAB 对上表数据按年份进行聚类分析, 结果如图 1 所示。

结果显示, 在最终聚为一类之前, 计算年份聚为 3 类, 包括: 2003 年、2006 年之前和 2006 年之后。相关系数达到 0.77, 聚类结果较好。分别取 2003 年、2006 年和 2010 年为典型年, 以进行深入分析。

4.2. 本模型计算结果与超效率 CCR 模型结果对比

鉴于现有研究结果大多应用 CCR 模型与超效率 CCR 模型, 以 2006 年数据为例, 将上述计算结果与超效率

Table 1. Resulting data of the super DEA model

表 1. 超效率 DEA 模型计算结果

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
北京	1.15	1.30	1.34	1.32	1.41	1.75	1.86	3.14	3.37	3.65	3.47	2.97	2.65	2.68	2.84
天津	2.13	3.42	3.13	2.14	2.62	2.76	2.44	2.59	2.84	3.67	3.89	3.00	3.04	3.78	3.71
河北	1.10	1.09	1.05	1.09	0.94	1.37	1.29	1.75	1.59	1.72	1.04	1.08	2.88	1.59	1.19
山西	0.85	0.71	0.70	0.62	0.71	0.79	1.03	1.19	1.09	1.17	0.96	0.73	0.98	0.82	0.78
内蒙古	1.22	1.29	1.31	1.32	1.25	1.08	1.27	1.47	1.41	1.59	1.46	1.53	1.55	1.37	1.41
辽宁	0.84	0.85	0.79	0.83	0.87	3.52	1.06	0.94	0.80	0.77	0.79	0.83	0.92	0.93	0.96
吉林	1.07	0.95	0.92	1.00	0.87	1.84	0.93	0.91	0.94	1.01	0.98	1.02	0.95	1.02	1.03
黑龙江	0.85	0.81	0.85	0.85	0.82	0.79	0.84	0.77	1.16	1.28	1.07	0.96	1.14	0.99	1.09
上海	2.62	2.09	2.18	2.07	2.38	3.58	2.72	2.07	1.78	1.94	2.22	2.42	2.20	4.40	3.58
江苏	0.84	0.68	0.69	0.82	0.64	0.89	1.33	0.78	0.64	0.80	0.80	1.14	1.39	1.18	1.42
浙江	0.97	0.86	0.80	0.78	0.77	0.86	0.72	0.72	0.76	0.74	0.69	0.67	0.68	0.76	0.77
安徽	1.01	0.96	0.91	0.93	0.93	0.97	1.03	0.86	0.83	0.84	0.96	0.91	0.92	0.78	0.80
福建	1.27	1.14	0.97	0.89	0.84	0.76	0.71	0.71	0.74	0.76	0.77	0.85	0.87	0.85	0.75
江西	0.71	0.74	0.79	0.77	0.72	0.75	0.78	0.75	0.70	0.73	0.79	0.72	0.72	0.71	0.65
山东	1.45	1.59	1.54	1.30	2.00	1.91	1.83	1.81	1.83	1.65	1.64	1.61	1.40	1.32	2.06
河南	1.11	1.08	1.16	1.05	1.18	1.14	1.14	1.29	1.14	1.17	1.04	0.99	1.11	1.06	1.03
湖北	0.76	0.59	0.54	0.55	0.64	0.91	10.35	7.92	7.94	7.64	10.15	5.60	5.38	5.43	5.76
湖南	0.63	0.64	0.64	0.66	0.61	0.60	0.65	0.67	0.70	0.76	0.88	0.81	0.85	0.96	0.90
广东	0.61	0.62	0.57	0.54	0.56	0.66	0.50	0.58	0.68	0.62	0.65	0.64	0.64	0.61	0.78
广西	0.58	0.56	0.54	0.51	0.49	0.47	0.50	0.45	0.50	0.47	0.46	0.51	0.52	0.83	0.74
海南	1.50	1.65	1.71	1.63	1.83	1.66	3.23	3.47	3.10	3.38	3.52	4.71	5.31	5.32	3.20
重庆	2.13	2.06	1.80	1.82	1.75	1.62	1.83	1.71	1.81	1.58	1.57	1.73	1.73	1.58	1.58
四川	1.00	1.11	0.85	0.97	0.93	0.91	0.94	0.91	0.98	1.16	1.20	1.04	1.07	1.11	1.07
贵州	0.73	0.80	0.80	0.78	0.76	0.82	0.76	0.84	0.83	0.92	1.00	1.05	1.06	0.98	0.91
云南	0.88	0.95	0.96	0.99	0.93	1.10	0.94	1.11	1.07	1.02	1.04	1.13	1.07	0.99	0.94
西藏	2.94	3.61	2.15	6.46	6.84										
陕西	0.80	0.79	0.77	0.80	0.78	0.98	0.78	0.78	0.82	0.82	0.93	1.01	1.16	1.05	1.17
甘肃	0.77	0.71	0.78	0.86	0.89	0.78	0.98	0.78	0.83	0.80	0.92	0.92	1.04	0.96	1.00
青海	1.03	0.99	1.00	1.13	1.25	1.05	1.04	0.93	0.93	0.96	1.05	0.91	1.11	1.14	1.67
宁夏	1.32	1.42	1.10	1.07	1.03	1.02	0.96	1.08	1.11	1.30	1.49	1.49	1.65	1.64	1.70
新疆	0.88	0.89	0.96	0.92	0.90	0.91	0.87	0.92	0.89	0.94	0.89	0.93	1.24	1.01	0.98

CCR 模型的计算结果进行对比分析, 结果如图 2 所示。其中, 实线为本文构造模型的计算结果, 虚线为超效率 CCR 模型的计算结果。

从图 2 可以看出, 各省用水效率与不考虑非期望输出时相比, 大部分省份保持持平或有所升高, 少部分省份

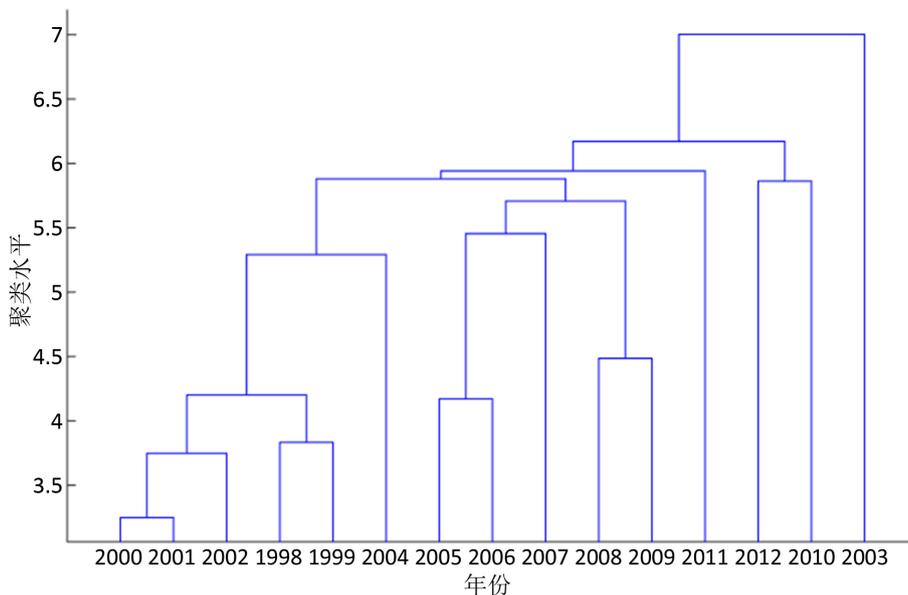


Figure 1. The result of cluster analysis
图 1. 聚类分析结果

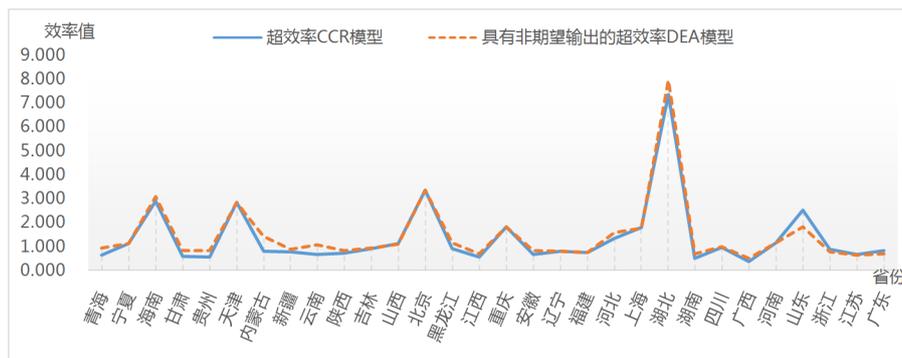


Figure 2. Comparing of the results of the two models
图 2. 两种模型计算结果对比

效率值降低。这是由于 DEA 模型计算出的是某个单元相对于全部决策单元的相对效率值，模型的约束条件发生变化，引起“生产可能集”的变化，导致效率值产生差异。结合水资源公报资料，对两种模型不同的计算结果进行分析。

当两种模型计算结果持平时，说明环境污染不是该省用水效率的决定性因素。

应用本文构造的模型计算，当效率值变低时，说明污水排放量大，以至于直接导致效率的绝对值减低，如山东、浙江、江苏、广东等省份。数据调查结果显示，这些省是当年污水排放量最大的几个省份。因此，本模型计算结果说明，极大的污水排放量会导致更低的用水效率，符合实际情况，且与以往研究结果相符[8]。

应用本文构造的模型计算，当用水效率值变高时，不能根据用水效率的“绝对值”直接说明具有非期望输出时用水效率更高。此时，应根据各省效率值的相对高低，并结合各省具体的污染排放、水资源量和经济发展情况，进行细致分析。例如，利用超效率 CCR 模型计算时，内蒙古自治区和黑龙江省用水效率分别为 0.79 和 0.89，应用本文构造的模型计算时，内蒙古自治区和黑龙江省用水效率分别为 1.41 和 1.16，均有所提升，但用水效率相对高低发生变化。考虑污染排放情况，黑龙江省废水总量、COD 排放分别为 115658 和 49.80 万吨，远高于内蒙古自治区的 61509 和 29.80 万吨，因此，相对于内蒙古自治区，黑龙江省污染情况更为严重，因此内蒙古自治区用水效率更高。结果说明，考虑水资源利用造成的负面效果时，环境问题严重(即排污量大)的省份，

受到排污影响大, 相对而言, 其效率值应该比问题轻微的省份要低。因此, 应用本文构造的模型计算, 省际之间效率值的相对高低与实际情况相符。

应用本文构造的模型进行用水效率分析时, 除关注本身效率值之外, 还应关注各省之间的效率值的相对高低, 并结合各省实际用水情况和水资源情况进行深入分析。

4.3. 模型计算结果对非期望输出的敏感程度

为探究模型计算结果对非期望输出的敏感程度, 以 2006 年数据为例, 将所有省份非期望输出项, 即废水排放总量、COD 排放量和氨氮排放量分别增大和减小 20%, 再利用本文构造的模型进行计算。结果显示, 与现实情况效率值相比, 30 个省份(不含西藏自治区)中, 有 17 个省份的用水效率会发生明显变化。将计算结果绘图如下, 图 3 中, 圆点表示显示情况效率值, 线段的上下端点分别表示非期望输出减小 20% 和增大 20% 情况下的效率值。

可以看出, 当非期望输出减小时, 用水效率会明显提升, 所有省份平均提升 8.6%, 其中, 青海省用水效率提升最多, 达到 25.2%; 当非期望输出增大时, 用水效率会明显下降, 所有省份平均下降 5.8%, 其中, 云南省下降最多, 达到 15.8%。

结果表明, 非期望输出的变化对用水效率影响较为显著, 与文献调研结果相符[8] [14] [15] [16]。因此, 在进行用水效率评价时, 环境污染因素不能忽视, 相较于现有的应用数据包络分析模型的评价结果, 本模型更为合理, 应用本文构造的模型计算的水资源利用效率, 可以反映省际之间效率值受排污影响的相对高低, 进而可为调控污染排放提供理论依据。

4.4. 决策单元(省)在弱有效面上的投影计算

为将 DEA 无效单元转化为 DEA 有效单元, 对决策单元进行在弱有效面上的投影计算, 得到具体的转化措施, 如减小水资源消耗、减小污染或提高用水的经济效益等。鉴于本文数据资料较多, 仅以 2006 年山西省数据为例进行分析, 通过 MATLAB 编程进行计算, 得到 2006 年, 山西省各项输入、输出指标在有效面上的投影为:

$$\begin{cases} \hat{X}_0 = (304.05, 248.65, 33.31, 16.71, 8.41, 0.46) \\ \hat{Y}_0 = (276.77, 2748.33, 2037.47, 39074.38) \\ \hat{Z}_0 = (88532.22, 22.18, 2.45) \end{cases} \quad (7)$$

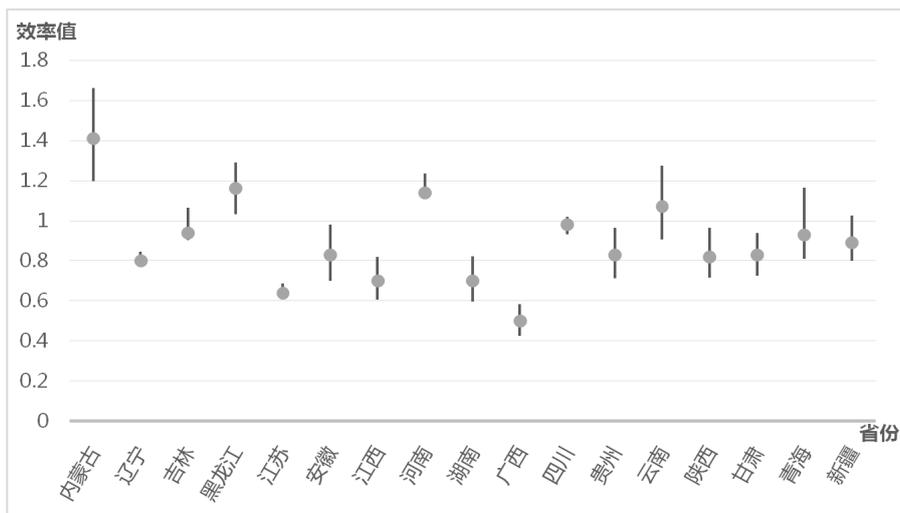


Figure 3. The sensitivity analysis of the results with undesirable outputs
图 3. 计算结果对非期望输出的敏感程度

山西省的各项输入数据为:

$$\begin{cases} \hat{X}_0 = (7466.7, 262.28, 34.22, 15.38, 9.27, 0.42) \\ \hat{Y}_0 = (276.77, 2748.33, 1727.44, 14123) \\ \hat{Z}_0 = (102856, 38.70, 4.24) \end{cases} \quad (8)$$

山西省各项输入数据与有效面上投影值之差, 即当前各项指标值与效率最优时指标值之差为:

$$\begin{cases} X_0 - \hat{X}_0 = (7162.65, 13.63, 0.91, -1.33, 0.86, -0.04) \\ \hat{Y}_0 - Y_0 = (0, 0, -310.03, -24951.38) \\ Z_0 - \hat{Z}_0 = (14323.78, 16.52, 1.79) \end{cases} \quad (9)$$

式中: x_0 各项数据分别对应于年降水量、人均水资源量、生活用水、工业用水、农业用水、环境用水; y_0 各项数据分别对应于一产产值、二产产值、三产产值和人均 GDP; z_0 各项数据分别对应于污水排放总量、COD 排放量、氨氮排放量。

由于年降水量和人均水资源量不会随着行政决策而变化, 为提高用水效率, 可通过节水政策和水资源循环利用等方式, 将农业用水、工业用水、生活用水、环境用水分别减少至 34.22、15.38、9.27 和 0.42 亿 m^3 ; 通过技术创新、管理创新等手段, 保持各产业产值增加, 将人均 GDP 提高到 39074.38 元; 将污水排放总量削减到 88532.22 万吨、COD 和氨氮排放量分别削减至 22.18 和 2.45 万吨。可见, 农业用水冗余量最大, 即节水潜力最大, 与以往研究结果相符[9] [11]。

本文构造的模型和投影计算的方式, 可用于水资源优化配置。在年初对全年用水进行规划时, 可以通过上述方法对规划进行调整和优化, 从而达到 DEA 有效、或接近有效面。

5. 结论

本文研究了全国各省水资源利用效率的计算和评价问题, 利用 DEA 理论和思想, 结合水资源利用收益与污染并存的特点, 构造具有非期望输出的超效率 DEA 模型, 用于各个省份用水效率的计算和评价。

在应用本文构造的模型进行计算时, 各省用水效率受污水排放的影响, 与应用超效率 CCR 模型计算结果不同。分析表明, 本文构造的模型在一定程度上更加准确, 能够反映水资源利用的特点。在进行用水效率评价时, 除以本模型计算结果为依据, 还应该结合当地实际用水特征进行全面地分析和评价。

“投影”计算的结果, 为用水低效省份的合理调整提供依据。通过对年初水资源利用规划的水量和排污指标进行调整和重新分配, 可实现某省全年用水效率达到 DEA 有效。

由于当前水资源利用效率问题研究方式和结果差异较大, 本文仅与现有的超效率 CCR 模型计算结果进行对比, 显示出该模型的优越性。但对本文构造的“考虑非期望输出的超效率模型”, 尚未有更好的方法将其计算结果与现实情况进行对比和验证。未来, 可以将 DEA 模型的计算结果与现实效率情况进行比较, 进行更为严谨的实证分析, 并对模型进行调整和优化。

基金项目

中国科学院大学生创新实践训练计划项目; 国家重点研发计划项目(2016YFC0401402)。

参考文献 (References)

- [1] 左其亭, 陈曦. 面向可持续发展的水资源规划与管理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
ZUO Qiting, CHEN Xi. Planning and management of water resources for sustainable development. Beijing: China Water & Power Press, 2003. (in Chinese)

- [2] 裴志涛, 何俊仕. 基于 BP 神经网络的水资源利用效率评价方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2013(5): 30-32.
PEI Zhitao, HE Junshi. Research on methods of efficiency evaluation of water resources utilization based on BP neural network. China Rural Water and Hydropower, 2013(5): 30-32. (in Chinese)
- [3] 白颖, 王红瑞, 许新宜, 等. 水资源利用效率及评价方法若干问题研究[J]. 水利经济, 2010, 28(3): 1-4.
BAI Ying, WANG Hongrui, XU Xinyi, et al. Relevant issues on utilization efficiency and evaluation methods for water resources. Journal of Economics of Water Resources, 2010, 28(3): 1-4. (in Chinese)
- [4] 朱乔, 盛昭瀚, 吴广谋. DEA 模型中的有效性问题[J]. 东南大学学报(自然科学版), 1994, 24(2): 78-82.
ZHU Qiao, SHENG Zhaohan and WU Guangmou. Efficiency in DEA model. Journal of Southeast University, 1994, 24(2): 78-82. (in Chinese)
- [5] 马占新. 数据包络分析模型与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
MA Zhanxin. Data envelopment analysis model and method. Beijing: China Science Publishing, 2010. (in Chinese)
- [6] CHARNES, A., COOPER, W. W. and RHODES, E. Measuring the efficiency of decision making units. European Journal of Operational Research, 1978, 2(6): 429-444.
- [7] NORTON JR., J. W., WEBER JR., W. J. Water utility efficiency assessment using a data envelopment analysis procedure. Journal of Infrastructure Systems, 15(2): 80. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2009\)15:2\(80\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2009)15:2(80))
- [8] 伍晓涛, 桂威, 刘合耀, 等. 基于数据包络分析的用水效率评价[J]. 中国农村水利水电, 2013(10): 10-12.
WU Xiaotao, GUI Wei, LIU Heyao, et al. Evaluation of water utility efficiency based on data envelopment analysis. China Rural Water and Hydropower, 2013(10):10-12. (in Chinese)
- [9] 吉亚辉, 张浩文, 姜玲. 基于数据包络分析的兰州市水资源效率评价[J]. 资源与产业, 2012, 14(1): 55-58.
JI Yahui, ZHANG Haowen and JIANG Ling. Water efficiency evaluation of Lanzhou based on data envelopment analysis. Resources & Industries, 2012, 14(1): 55-58. (in Chinese)
- [10] 王莹. 中国省际水资源利用效率及影响因素分析——基于超效率 DEA 与 Tobit 模型[J]. 中国农村水利水电, 2015(5): 41-44.
WANG Ying. Chinese provincial water resources utility efficiency and its influencing factors based on super efficiency DEA and Tobit model. China Rural Water and Hydropower, 2015(5): 41-44. (in Chinese)
- [11] 董战峰, 喻恩源, 裘浪, 等. 基于 DEA 模型的中国省级地区水资源效率评价[J]. 生态经济, 2012(10): 43-47.
DONG Zhanfeng, YU Enyuan, QIU Lang, et al. Water efficiency evaluation of the provincial regions in china based on DEA. Ecological Economy, 2012(10): 43-47. (in Chinese)
- [12] 赵良仕. 中国省际水资源利用效率测度、收敛机制与空间溢出效应研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 辽宁师范大学, 2014.
ZHAO Liangshi. Research on the water resource utilization efficiency, measure, convergence mechanism and spatial spillover effect model. Dalian: Liaoning Normal University, 2014. (in Chinese)
- [13] 张增强. 我国水污染经济损失研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2005.
ZHANG Zengqiang. Research on the Economical Loss Caused by Water Pollution. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2005. (in Chinese)
- [14] 宋马林, 王舒鸿, 刘庆龄, 等. 一种改进的环境效率评价 ISBM-DEA 模型及其算例[J]. 系统工程, 2010, 28(10): 91-96.
SONG Malin, WANG Shuhong, LIU Qingling, et al. A new ISBM-DEA model on environmental efficiency measurement and its numerical examples. Systems Engineering, 2010, 28(10): 91-96. (in Chinese)
- [15] 孙立成, 周德群, 李群. 基于非径向 DEA 模型的区域环境绩效评价研究[J]. 统计与信息论坛, 2009, 24(7): 67-71.
SUN Licheng, ZHOU Dequn and LI Qun. Study on regional environmental performance based on non-radial DEA model. Statistics & Information Forum, 2009, 24(7): 67-71. (in Chinese)
- [16] 宋马林, 曹秀芬, 吴杰. 一个新的考虑非期望产出的非径向一双目标 DEA 模型[J]. 管理科学, 2011, 24(4): 113-120.
SONG Malin, CAO Xiufen and WU Jie. A new non-radial and bi-objective DEA model considering undesirable outputs. Journal of Management Science, 2011, 24(4):113-120. (in Chinese)
- [17] 杨爱萍. 数据包络分析(DEA)及具有非期望输出决策单元的 DEA 效率评价[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2003.
YANG Aiping. Data envelopment analysis and DEA efficiency assessment of decision making units with undesirable outputs. Tianjin: Tianjin University, 2003. (in Chinese)
- [18] 魏权龄. 数据包络分析(DEA) [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
WEI Quanling. Data envelopment analysis. Beijing: China Science Publishing, 2000. (in Chinese)