

基于数据包络分析模型的江苏省 农业水资源利用效率评价

张娜娜¹, 王海涛², 吴颖超¹, 闵兴华¹, 曹磊¹, 赵言文¹

(1. 南京农业大学 资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095; 2. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225009)

摘要: [目的] 研究江苏省 2002—2011 年农业水资源利用效率, 为提高该省农业水资源利用率提供依据。[方法] 采用数据包络分析(DEA)模型中 C²R 和 BC² 两种模型, 选取的投入指标为农作物播种面积、农田灌溉用水量、农田灌溉耗水量和农业在岗职工人数; 产出指标为有效灌溉面积、农村居民人均农业收入、农业生产总值和农作物产量。[结果] (1) 在 2002—2011 年期间, 江苏省农业水资源利用效率处于较高的水平, DEA 有效年份占 50%; (2) 造成 DEA 无效既有技术原因也有规模原因, 存在投入冗余和产出不足; (3) 随着时代发展, 江苏省农业水资源利用投入冗余和产出不足整体呈现逐渐降低趋势。[结论] 江苏省农业水资源利用情况得到了逐步改善。

关键词: 农业; 水资源; DEA 模型; 利用效率

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2015)04-0299-05

中图分类号: S273.1

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.04.052

Evaluation on Agricultural Water Utilization Efficiency of Jiangsu Province Based on Data Envelopment Analysis Model

ZHANG Nana¹, WANG Haitao², WU Yingchao¹, MIN Xinghua¹, CAO Lei¹, ZHAO Yanwen¹

(1. College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China;
2. Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract: [Objective] The agricultural water utilization efficiency of Jiangsu Province from 2002 to 2011 was investigated in order to provide the basis for improving the utilization efficiency of agricultural water resources in the province. [Methods] Both C²R and BC² models of data envelopment analysis (DEA) were used. The input indicators included crop planting area, farmland irrigation volume, water consumption of farmland irrigation and the numbers of employed staff engaging in agriculture. The output indicators included effective irrigation area, agricultural per capita income of rural resident, gross agricultural production and crop yield. [Results] (1) The agricultural water utilization efficiency of Jiangsu Province is at a higher level during the periods from 2002 to 2011, the effective years of DEA accounted for 50%. (2) Reasons were both technology and scale in the invalid years of DEA. The invalid years of DEA had shown the input redundancy and output deficiency. (3) With the development of times, the trend of input redundancy and output deficiency in agricultural water utilization is slowing down in Jiangsu Province. [Conclusion] The utilization of agricultural water resources in Jiangsu Province had been improved.

Keywords: agriculture; water resources; DEA model; utilization efficiency

江苏省滨江临海, 地处江淮流域下游, 长江、太湖、淮河、沂沭泗 4 大水系在江苏交汇, 境内水网密布、河湖众多, 长江、淮河穿腹而过, 京杭运河纵贯南北, 既沟通了 4 大水系, 又连接太湖、邵伯湖、高邮湖、

洪泽湖、骆马湖、微山湖等一批主要湖泊, 加之江苏处在南北气候过渡地带, 降雨时空分布不均, 特殊的地理位置和气候条件, 决定了江苏水资源有其明显特点。江苏多年平均降雨量 1 018.4 mm, 入境水量多

收稿日期: 2013-12-06

修回日期: 2013-12-31

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“农村发展中生态环境管理研究”(70833001)

第一作者: 张娜娜(1988—), 女(汉族), 陕西省榆林市人, 硕士研究生, 研究方向为生态农业、水土保持、环境规划与环境影响评价。E-mail: 2011103038@njau.edu.cn.

通信作者: 赵言文(1965—), 男(汉族), 江苏省徐州市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事环境生态学、生态农业和水土保持方面的研究。E-mail: ywzhao@njau.edu.cn.

达 $1.03 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 水资源总量丰富。但过境水较多, 受到工程和资金限制, 可利用量较少。2011 年该省水资源总量为 $4.92 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 其中地表水资源量 $4.00 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 地下水资源量 $1.15 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 人均水资源占有量不足 500 m^3 , 为全国人均的 $1/4$ 。江苏省各地经济发展水平有一定的差异, 用水结构也有明显的不同。农业是江苏省最大的用水户, 占总用水量的 50% 左右。长江和太湖流域经济发展水平较高, 工业和城镇生活用水较多, 而该地区降雨量丰富, 灌溉用水量较少, 两者基本持平。而淮河流域主要为农业用水, 灌溉用水量占全省总灌溉用水量的 55% 以上, 占淮河流域总用水量的 68%。另外长江和太湖流域土地灌溉率已经超过 90%, 加上经济发展对耕地的占用, 可增加的灌溉面积不大, 用水量变化相对较小。而经济相对较弱的淮北地区, 今后仍以农业为主, 而且由于气候变化对该区复种指数影响较大, 单位面积耕地农业用水量有增加的趋势。但随着工业和城市化进程的发展, 工农业用水竞争加剧, 加上南水北调东线工程水量北送要求提高, 可供利用的农业用水量将进一步降低, 加大了农业水资源不足的矛盾。据估算, 单方农业用水的产值只有工业和城市的 1%~2%, 在农业和工业、城市用水的竞争, 农业用水显然处于不利地位, 农业用水被挤占将不可避免。从工业化国家的发展规律来看, 农业用水量所占比例一般会随着经济发展逐步减少。江苏省制定的用水发展规划中, 提出了农业用水负增长, 工业用水可适度增长, 生活用水优先保障, 生态环境用水适度增加的要求, 农业用水量, 尤其是目前缺水最严重的淮北地区, 灌溉用水量将进一步减少, 使农业用水面临的形势更趋严峻。因此如何解决农业灌溉用水问题, 成为当今人们面临的迫切任务。

中国是农业大国, 很多学者^[1-7] 采取不同研究方法从不同层面、不同尺度研究了水资源利用效率, 研究方法包括遗传投影寻踪法、GIS、比值分析法、包络分析法、生产函数法及层次分析法等。尺度以县市、省或者全国为研究对象。但对于江苏省而言, 目前还没有看到学者运用 DEA 对农业水资源利用效率进行评价, DEA 方法以相对效率概念为基础, 以凸分析和线性规划为工具的一种评价方法, 应用数学规划模型计算比较决策单元之间的相对效率, 对评价对象做出评价, 它能充分考虑对于决策单元本身最优的投入产出方案, 因而能够更理想地反映评价对象自身的信息和特点, 同时对于评价复杂系统的多投入多产出分析具有独到之处。适用于多输入—多输出的有效性

综合评价问题, 在处理多输入—多输出的有效性评价方面具有绝对优势。DEA 方法并不直接对数据进行综合, 因此决策单元的最优效率指标与投入指标值及产出指标值的量纲选取无关, 应用 DEA 方法建立模型前无须对数据进行无量纲化处理, 也可以避免人为主观因素的影响。本研究运用 DEA 中重要的两个模型 C^2R 模型和 BC^2 模型该模型, 对江苏省 2002—2011 年多投入多产出的农业水资源利用效率进行评价, 通过 DEA 识别相对有效无效年份, 衡量无效的严重性, 并通过对无效和有效年份的比较, 发现降低无效的方法, 以提高江苏省农业水资源利用率。

1 研究方法

1.1 水资源利用概况

通过对江苏省总用水量、总耗水量、农田灌溉用水量及农田灌溉耗水量 4 个要素进行统计分析, 从图 1 可以看出, 4 个要素在 2003 年均明显出现先下降后上升趋势, 其余年份变化缓慢。通过气象分析, 2003 年年降水量为 $1\,255.8 \text{ mm}$, 较多年平均值增加了 237.4 mm , 降雨丰富, 致使用水量及耗水量均减少。总用水量从 2002 年的 $4.79 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 增长到 $5.56 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 虽然在 2003 年出现下降, 但整体呈缓慢上升趋势。其余 3 个要素在 2003 年出现明显下降外, 整体呈现先缓慢下降后缓慢上升的趋势, 总体变动不大。

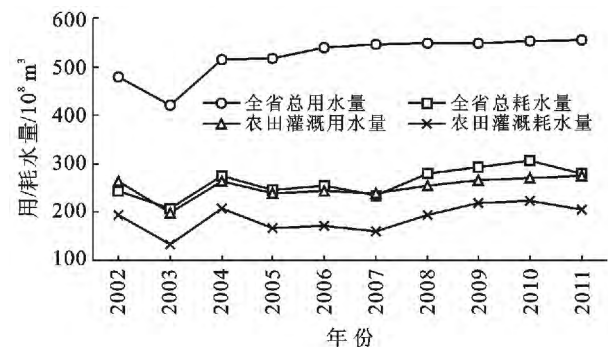


图 1 江苏省 2002—2011 年水资源利用情况

1.2 DEA 评价模型

DEA (data envelopment analysis), 即数据包络分析, 是美国著名运筹学家 Charnes 等^[8] 提出的一种效率评价方法, 以传统的工程效率概念和生产函数理论为基础来评价决策单元之间的相对效率, 不仅可以对决策单元的有效性作出度量, 而且还能指出决策单元非有效的原因和程度, 给单位部门提供管理信息。DEA 具有多个模型, 其中重要的两个模型是 C^2R 模型和 BC^2 模型^[8-10]。 C^2R 模型为:

$$\begin{cases} \min \theta - \epsilon (\sum_{r=1}^t s_r^+ + \sum_{i=1}^m s_i^-) \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^- = \theta x_{ij0} \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = y_{rj0} \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ ——第 j 个决策单元 DMU 的有效值,即投入相对于产出的相对效率; ϵ ——阿基米德无穷小量,可取 $\epsilon=10^{-5}$; t, m ——产出指标和投入指标; n ——决策单元 DMU 的个数; λ_j ——相对于 DMU _{i} 重新构造的一个有效 DMU 组合中第 j 个决策单元 DMU 的组合比例 $\lambda_j \geq 0, j=1, 2, \dots, n$; s_i^-, s_r^+ ——松弛变量,分别代表投入冗余和产出不足 $s_i^- \geq 0; s_r^+ \geq 0$; x_{ij} ——第 j 个决策单元对第 i 种类型投入的投入量; y_{rj} ——第 j 个决策单元对第 r 种类型产出的产出量。

若上述问题的最优解为 $\lambda^*, s^{-*}, s^{+*}, \theta^*$, 则有如下结论与经济含义:

(1) 若 $\theta^* = 1$, 且 $s^{-*} = 0, s^{+*} = 0$, 则决策单元 DMU _{i} 为 DEA 有效, 此时, 其形成的有效前沿为规模收益不变, 决策单元 DMU _{i} 的生产活动同时为技术有效和规模有效。

(2) 若 $\theta^* < 1$, 则决策单元 DMU _{i} 为 DEA 无效。其生产活动不是技术效率最佳, 或不是规模效率最佳。 $\sum \lambda_j$ 用来判断 DUM 的规模收益情况: 如果存在 $\lambda_j (j=1, 2, \dots, n)$, 使得 $\lambda_j = 1$, 则 DUM 为规模收益不变; 如果不存在 $\lambda_j (j=1, 2, \dots, n)$, 使得 $\sum \lambda_j = 1$, 若 $\sum \lambda_j < 1$, 则 DUM 为规模收益递增。

(3) 若 DUM 无效, 可以通过 DUM 在相对有效平面上的投影来改进非 DEA 有效的决策单元, 令 $x_0^* = \theta x_0 - s_i^-, y_0^* = y_0 + s_r^+$, 则 (x_0^*, y_0^*) 为 (x_0, y_0) 生产有效前沿面上的投影, 即相对于原来的 n 个 DUM 是有效的。 C^2R 模型可以用来衡量整体效率, 但是无效率时, 可能是技术因素或是规模因素造成的。在 C^2R 模型的基础上增加了凸性假设 $\sum \lambda_j^* = 1$, 并将 θ 改成 σ , 就得到 BC^2 模型, 使用 BC^2 模型可以评价各决策单元的纯技术效率, BC^2 模型下的 DEA 有效, 是技术有效, 但不一定是规模有效。

令 $s = \theta / \sigma$, 则 s 为规模效率。 $s = 1$, 规模有效; $s < 1$, 则规模无效。

C^2R 模型和 BC^2 模型配合使用, 可以评价每个的技术效率、纯技术效率和规模效率。

1.3 数据来源

农业是江苏省最大的用水户, 占总用水量的 50% 左右。随着工业和城市化进程的发展, 工农业用水竞争加剧, 水资源短缺成为制约农业可持续发展的

重要因素。因此解决如何以有限的水资源支持地区农业及经济社会可持续发展, 成为各级政府面临的迫切任务。

研究数据来源于 2002—2011 年历年《江苏省水资源公报》和《江苏省统计年鉴》。

2 实例分析

2.1 指标选取

研究根据《江苏省水资源公报》和《江苏统计年鉴》, 选取了农作物播种面积、农田灌溉用水量、农田灌溉耗水量、农业在岗职工人数作为投入指标, 这 4 项指标综合反映了江苏省农业水资源的供给能力, 以有效灌溉面积、农村居民人均农业收入、农业生产总值和农作物产量作为产出指标, 进而采用 DEA 模型评价全省农业水资源的利用效率(表 1)。

(1) 农作物播种面积。指实际播种或移植有农作物的面积, 不论种植在耕地上还是种植在非耕地上, 均包括在农作物播种面积中。目前, 农作物播种面积主要包括粮食、棉花、油料、糖料、麻类、烟叶、蔬菜和瓜类、药材和其它农作物 9 大类。该指标能反映实际种植有农作物的面积。

(2) 农田灌溉用水量。指从水源引入的农田灌溉水量, 包括作物正常生长所需灌溉的水量、渠系输水损失水量和田间灌水损失水量。该指标作为投入指标之一, 可以反映农业对水资源需求情况。

(3) 农田灌溉耗水量。主要消耗于渠系损失、农田蒸发、渗漏以及深层入渗等。该指标反映了农业灌溉水资源有效利用情况。

(4) 农业在岗职工人数。主要指国有单位、城镇集体单位和其他类型单位从事农业行业的工作人员。农业水资源消费主体是人, 从消费的角度考虑, 农业水资源利用效率高高低跟农业从业人员的知识水平和技能有很大关系, 因此选取该指标作为投入指标, 用于分析农业水资源利用技术投入情况。

(5) 有效灌溉面积。指灌溉工程或设备已经配备, 能够进行正常灌溉的水田和水浇地面积之和。该指标作为产出指标, 可以反映农田抗旱能力和水资源是否充足情况。

(6) 农村居民人均农业收入。水资源作为农业发展的必备要素, 其投入能带给农村居民一定的经济收入, 因此选取该指标作为产出指标之一。

(7) 农作物产量。指在一定时期内(通常是一年)生产的各种农作物产品总产量。农业是水资源消耗最大的产业, 农作物产量是农业产出的主要指标, 因此, 选取该指标作为水资源在农业发展利用中产出

指标之一。

规模和总水平以及农作物产量的经济价值。也作为

(8) 农业生产总值。反映了全省农业生产的总

农业产出指标之一。

表 1 江苏省 2002—2011 年投入产出指标值

年份	农作物播种面积/ 10 ³ hm ²	农田灌溉用水量/ 10 ⁸ m ³	农田灌溉耗水量/ 10 ⁸ m ³	农业在岗职工人数/ 万人	有效灌溉面积/ 10 ³ hm ²	农村居民人均农业收入/元	农业生产总值/ 亿元	农作物产量/ 10 ⁴ t
2002	7 797.40	263.47	194.74	11.72	3 886.04	798.60	896.39	7 645.28
2003	7 681.49	199.00	133.28	10.69	3 840.98	759.20	981.25	6 877.46
2004	7 668.98	264.42	207.91	10.91	3 839.02	957.60	1 242.41	7 245.72
2005	7 641.20	239.60	167.54	10.61	3 817.67	946.40	1 291.06	7 114.35
2006	7 385.16	244.30	172.52	10.87	3 837.72	1 000.70	1 416.91	7 390.49
2007	7 407.73	238.70	161.27	10.49	3 826.95	1 084.80	1 542.53	7 054.00
2008	7 510.27	255.20	193.94	9.12	3 817.10	1 152.20	1 746.83	7 360.46
2009	7 558.15	266.20	218.50	8.04	3 813.66	1 183.50	1 948.20	7 747.92
2010	7 619.58	270.30	222.90	7.69	3 819.74	1 323.50	2 269.56	8 159.23
2011	7 663.25	273.80	206.40	7.11	3 817.92	1 514.20	2 640.95	8 561.68

2.2 结果分析

将表 1 各个投入产出指标值带入 C²R 模型中求解,得到了 2002—2011 年江苏省农业水资源利用效率值(θ)及各年 DMU 的松弛变量值(s_i^- , s_r^+)。具体

值详见表 2。将表 1 指标值代入 BC² 模型中求解,得到 2002—2011 年江苏省农业水资源利用的纯技术效率值(σ),通过整理分析,各年的技术效率、纯技术效率、规模效率等值详见表 3。

表 2 C²R 模型求解结果

决策单元	θ	s_1^-	s_2^-	s_3^-	s_4^-	s_1^+	s_2^+	s_3^+	s_4^+
2002 年	0.964 5	0	2.621 5	8.480 4	0.792 2	0	284.066 9	703.043 8	0
2003 年	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2004 年	0.966 7	0	8.458 8	22.837 4	0	0	65.822 2	238.927 6	195.075 1
2005 年	0.974 2	0	0	3.867 8	0	0	94.365 3	198.286 1	0
2006 年	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2007 年	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2008 年	0.997 2	0	0	0.592 5	0	0	0	50.683 2	137.701 3
2009 年	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2010 年	0.998 9	0	0.566 3	12.103 3	0	0	24.125 1	16.001 5	0
2011 年	1	0	0	0	0	0	0	0	0

表 3 江苏省农业水资源利用技术效率(θ)、纯技术效率(σ)以及规模效率(s)

年份	技术效率(θ)	纯技术效率(σ)	规模效率(s)	判断值 $\sum \lambda_j$	规模收益
2002	0.964 5	1	0.964 5	1.013 3	规模递减
2003	1	1	1	1	规模不变
2004	0.966 7	0.969 8	0.996 8	1.001 1	规模递减
2005	0.974 2	0.977 0	0.997 2	0.996 8	规模递增
2006	1	1	1	1	规模不变
2007	1	1	1	1	规模不变
2008	0.997 2	0.997 9	0.999 2	0.999 1	规模递增
2009	1	1	1	1	规模不变
2010	0.998 9	0.999 5	0.999 4	1.000 8	规模递减
2011	1	1	1	1	规模不变

从表 2 得出,江苏省农业水资源利用 DEA 有效的年份为 2003,2006,2007,2009 和 2011 年。农业水资源利用效率值(θ)均为 1,且松弛变量 s_i^- 和 s_r^+ 均为 0,说明这 5 a 江苏省农业水资源投入和产出达到了最佳状态。而 2002,2004,2005,2008 和 2010 年水资源利用效率值(θ)均小于 1,DEA 无效,无效年份农业水资源利用效率值都达到了 0.95 以上,说明江苏省农业水资源利用效率处于较高的水平上。松弛变量 s_i^- , s_r^+ 不为 0,说明无效年份存在投入冗余和产出不足现象。 s_2^-, s_3^-, s_4^- 值不为 0,说明农田灌溉用水量、农田灌溉耗水量、农业在岗职工人数投入过多,2002 年以后,农业在岗职工人数投入达到了优化,无冗余。 s_1^+, s_3^+, s_4^+ 值不为 0,说明农村居民人均农业收

入、农业生产总值和农作物产量3方面产出不足。而在农作物播种面积投入和有效灌溉面积产出两方面达到了最优。

从表3可以得出,在技术效率有效的年份,其纯技术效率值都为1,达到纯技术有效;技术效率值小于1的年份,只有2002年纯技术有效,其余无效年份纯技术效率小于1,纯技术无效。说明农业水资源利用没有达到最优状态,需要进一步调整投入资源,以达到最佳产出。从规模效率层面分析,技术效率为1时,规模效率均有效;技术效率无效时,规模效率值均小于1,规模效率无效。2003,2006,2007,2009和2011年DEA有效,规模收益达到最佳阶段;2002,2004和2010年DEA无效,且规模收益递减,需减少资源过度投入,

造成浪费;2005和2008年DEA无效,但规模收益递增,表明可以扩大资源投入,以获得更多产出。

对DEA无效的年份进行有效平面投影调整,得到各个投入、产出指标需调整情况,“+”号代表投入冗余,“-”号代表产出不足。具体情况详见表4。从表4可以得出,在2002,2004,2005,2008和2010年,江苏省农作物播种面积没有得到充分利用,农田灌溉用水量、农田灌溉耗水量和农业在岗职工人数投入过多,造成水资源、人力资源的浪费。有效灌溉面积DEA投影为0,说明江苏省农业有效灌溉面积规模合理,而农村居民人均农业收入、农业生产总值和农作物产量3方面产出不足,需进一步提高农作物产量,增加农村居民农业收入。

表4 无效年份DEA投影结果

年份	农作物播种面积/ 10 ³ hm ²	农田灌溉用水量/ 10 ⁸ m ³	农田灌溉耗水量/ 10 ⁸ m ³	农业在岗职工人数/ 万人	有效灌溉面积/ 10 ³ hm ²	农村居民人均农业收入/元	农业生产总值/ 亿元	农作物产量/ 10 ⁴ t
2002	+276.97	+11.98	+15.40	+1.21	0	-284.07	-703.04	0
2004	+255.36	+17.26	+29.76	+0.36	0	-65.82	-238.93	-195.08
2005	+196.80	+6.17	+8.18	+0.27	0	-94.37	-198.29	0
2008	+21.19	+0.72	+1.14	+0.03	0	0	-50.68	-137.70
2010	+8.49	+0.87	+12.35	+0.01	0	-24.13	-16.00	0

3 结论

(1) 通过C²R模型分析,在2002—2011年期间,江苏省农业水资源利用效率处于较高的水平。DEA有效年份占50%,并且在无效年份中,其农业水资源利用效率都达到0.95以上。

(2) 造成江苏省农业水资源利用DEA无效的原因,既有技术原因也有规模原因。在投入指标中,农作物播种面积、农田灌溉用水量、农田灌溉耗水量和农业在岗职工人数存在冗余现象;产出指标值中,农村居民人均农业收入、农业生产总值和农作物产量存在产出不足现象。需进一步调整资源之间组合,以达到最佳产出。

(3) 从时间层面进行分析,随着时代发展,技术的进步,江苏省农业水资源利用投入冗余和产出不足整体呈现逐渐降低的趋势。说明江苏省农业水资源利用情况得到逐步改善。

(4) 江苏省农业水资源利用效率已达到较高的水平,为了进一步提高利用效率,需减少水资源利用量和劳动力的过多投入,鼓励技术创新,提高技术进步在农业水资源利用中的贡献。

[参考文献]

- [1] 刘渝,杜江,张俊飏. 湖北省农业水资源利用效率评价[J]. 中国人口·资源与环境,2007,17(6):60-65.
- [2] 封志明,郑海霞,刘宝勤. 基于遗传投影寻踪模型的农业水资源利用效率综合评价[J]. 农业工程学报,2005,21(3):66-70.
- [3] 殷欣,刘小刚,张焉,等. 基于投影寻踪的云南省农业水资源效率评价[J]. 水土保持通报,2013,33(5):271-275.
- [4] 王秀芬,陈百明,毕继业. 基于县域尺度的中国农业水资源利用效率评价[J]. 灌溉排水学报,2012,31(3):6-10.
- [5] 高媛媛,许新宜,王红瑞,等. 中国水资源利用效率评估模型构建及应用[J]. 系统工程理论与实践,2013,33(3):776-784.
- [6] 廖虎昌,董毅明. 基于DEA和Malmquist指数的西部12省水资源利用效率研究[J]. 资源科学,2011,33(2):273-279.
- [7] 于法稳,李来胜. 西部地区农业资源利用的效率分析及政策建议[J]. 中国人口·资源与环境,2005,15(6):35-39.
- [8] 魏权龄. 评价相对有效的DEA方法[M]. 北京:中国人民大学出版社,1988:33-57.
- [9] 盛昭瀚,朱乔,吴广谋. DEA理论、方法与应用[M]. 北京:科学出版社,1996:15-34.
- [10] 马占新,马生昀,包斯琴高娃. 数据包络分析及其案例[M]. 北京:科学出版社,2013:20-46.