

基于超效率 DEA 模型的宁夏工业水资源利用效率研究

郑乐^{1,2}, 杨法暄^{1,2}, 钱会^{1,2}, 徐盼盼^{1,2}

(1. 长安大学 水利与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 提高水资源利用效率是解决水资源短缺问题的关键。利用超效率 DEA 模型和 Malmquist 指数法, 选取工业耗水量、工业从业人数和工业固定资产净值为投入指标, 工业总产值和废污水排放量为产出指标, 对宁夏回族自治区 2006–2016 年的工业水资源利用效率从动态和静态两个角度进行了分析。结果表明: 宁夏地区工业用水效率整体良好, 技术效率是降低整个自治区工业用水效率的主要因素; 银川市和石嘴山市近 5 年用水状况较为合理且全要素生产率增长较快, 吴忠和中卫市劳动力冗余严重, 固原市技术和规模方面都最为落后。此研究可为全区工业生产以及资源配置提供科学依据。

关键词: 工业水资源利用效率; 超效率 DEA 模型; Malmquist 指数法; 技术效率; 规模效率; 宁夏

中图分类号: TV213.9; TV211.1+1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)02-0081-06

Study on the utilization efficiency of industrial water resources in Ningxia based on super-efficiency DEA model

ZHENG Le^{1,2}, YANG Faxuan^{1,2}, QIAN Hui^{1,2}, XU Panpan^{1,2}

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region, Ministry of Education, Xi'an 710054, China)

Abstract: Improving the water utilization efficiency (WUE) is the key to solve the problem of water resources shortage. Based on the super-efficiency data envelopment analysis (DEA) model and Malmquist index method, we selected the industrial water consumption, the number of industrial employees and the net value of industrial fixed assets as input indicators, and the industrial total output value and waste water discharge as output indicators to analyze the industrial WUE in Ningxia region from 2006 to 2016 from dynamic and static perspectives. The results showed that the industrial WUE of Ningxia region was good in general, and the technical efficiency was the main factor reducing the industrial WUE of the region. Yinchuan and Shizuishan had reasonable water consumption and rapid growth of total factor productivity in the past five years. Wuzhong and Zhongwei had serious labor redundancy problems, and Guyuan was the most underdeveloped city in technology and scale. This research provides scientific basis for industrial production and resource allocation in Ningxia.

Key words: industrial water resources utilization efficiency; super-efficiency data envelopment analysis (DEA) model; Malmquist index method; technical efficiency; scale efficiency; Ningxia

1 研究背景

近年来, 水资源问题日益突出, 引起了人们的密切关注。水资源问题的解决可以从两方面入手, 即提高水资源利用效率和控制水资源总使用量, 其中提高水资源利用效率是关键^[1]。我国工业水资源利用方面存在着诸多问题, 一方面, 全国各地工业水

资源供需矛盾较大^[2], 另一方面, 未经处理的工业废污水对环境造成了一定的影响, 也制约了我国经济社会的可持续发展^[3]。

目前, 我国对于水资源利用效率的研究主要集中在农业水资源利用和配置方面, 在工业方面, 主要集中在对全国各省区的用水效率研究上, 而对于省内各行政区的工业用水效率研究还未完全形成体系。在

收稿日期: 2019-08-15; 修回日期: 2019-11-05

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目 (201301084)

作者简介: 郑乐 (1996-), 女, 陕西渭南人, 硕士研究生, 主要从事水文与水资源方面的研究。

通讯作者: 钱会 (1963-), 男, 陕西咸阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水文地质方面的研究。

水资源利用效率的研究过程中常用的方法主要有主成分分析法^[4-5]、层次分析法^[6]、因子分析法^[7]、数据包络模型(DEA)^[8-17]、随机前沿生产函数(SFA)^[12]和超效率 SBM^[18-20]等,以上方法在实际应用中均存在一定程度的不足。在主成分分析法中,当主成分因子的符号有正有负时,综合评价函数意义不明确^[5];层次分析法定量数据较少,定性成分多,不易令人信服;因子分析法在计算因子得分时,最小二乘法有时会失效,不够稳定^[7];SFA 模型算法简便,结果受特殊点的影响较小,但更适用于单一产出的评价中;超效率 SBM 模型在利用效率评价方面考虑较为全面^[19],但对于软件要求较高;DEA 模型的使用较为广泛,可用于评价多投入、多产出的决策单元,也可计算投入或产出变量的冗余或不足且不易受到人为因素的影响,但无法区分有效决策单元的强弱^[21]。许多学者针对各种评价方法的不足都做了相应的改进,然而水资源利用效率评价中的人为因素产生的误差、投入产出指标的选取以及各指标之间的相互影响,均可对评价结果产生影响^[22]。

本文所采用的超效率 DEA 模型结合了 EMS 1.3 和 DEAP 2.1 两个软件,不仅保留了传统 DEA 模型可测算的技术效率、规模收益等要素,也可对有效的单元继续评价,同时相比超效率 SBM 模型操作上更为简便。基于宁夏地区的工业水资源利用现状,选取工业耗水量、工业从业人数和工业固定资产净值为投入指标,工业总产值和废污水排放量为产出指标,对宁夏地区 2006—2016 年的工业水资源利用效率从动态和静态两方面进行实证分析,并根据分析结果提出可行性建议。该研究结果对宁夏各投入资源的合理配置、水资源的高效利用以及环境生态保护具有重要意义。

2 研究区概况

宁夏回族自治区地处我国内陆西北地区,东邻陕西省,西部、北部与内蒙古自治区接壤,南部与甘肃省相连,干旱半干旱面积占全区总面积的 75% 以上,是全国水资源严重短缺的省份之一。该区属温带大陆性干旱、半干旱气候,全区多年平均降水量为 289 mm,不足全国平均水平的一半,各地年平均气温 5.6 ~ 10.1℃,自南向北递增,年平均蒸发量 1 312.0 ~ 2 204.0 mm,干旱指数达 4.3^[23]。

工业作为宁夏经济社会发展的一大产业,从发展以来形成的各类支柱性行业大多是用水需求量较大的能源、化工等重工业,如今工业方面的用水量已

“捉襟见肘”,而全区用水总量却在逐年减少,由 2012 年的 $6.933 \times 10^9 \text{ m}^3$ 减少至 2016 年的 $6.489 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。由宁夏统计年鉴可知,2017 年宁夏地区工业用水量仅为 $4.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全区总用水量的 6.8%,城镇废污水排放量达到了 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$,而污水处理率仅为 67%,且经预测,2020 年宁夏需水总量达到 $8.64 \times 10^9 \text{ m}^3$,全自治区缺水率将达 15.2%。在这样水量稀少且供需矛盾突出的背景下,如何平衡水资源、水环境和经济发展、区域协调发展成为当务之急。

3 研究方法与数据来源

3.1 超效率 DEA 模型

数据包络分析法(DEA)是美国著名运筹学家 Charnes 等提出的一种效率评价方法,该方法不用事先确定指标构建函数关系,可避免主观因素对模型构建的影响,且能区分有效决策单元和非有效决策单元的效率值大小,因此被广泛用于水资源利用效率的评价^[21]。而在传统 DEA 评价中,有效率的 DMU 值均显示为 1,无法继续评价有效决策单元的强弱,因此 Per Anersen 等学者在 1993 年提出一种超效率评价模型,在超效率 DEA 评价中可以进行进一步区分决策单元的有效程度,使结果更具有区别性,可以提高评价的客观性和准确性^[10]。

假设在超效率模型中有 n 个决策单元,每个决策单元中有 m 个投入变量和 s 个产出变量^[18],对于第 i 个单元,有 $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{im})$ 和 $Y_i = (Y_{i1}, Y_{i2}, \dots, Y_{is})$,则该超效率模型为:

$$\min[\theta - \varepsilon(\sum_i^m S_i^- + \sum_j^s S_j^+)] \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i=1, i \neq i_0}^n X_i Y_i + S^- = \theta X_{i_0} \\ \sum_{i=1, i \neq i_0}^n Y_i \lambda_i - S^+ = Y \\ \lambda_i \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \\ S^+ \geq 0, S^- \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ 为水资源利用综合效率; $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ 为 n 个决策单元的组合系数; $S^- = (S_1^-, S_2^-, \dots, S_m^-)$ 为 m 项输入的松弛变量; $S^+ = (S_1^+, S_2^+, \dots, S_s^+)$ 为 s 项输出的松弛变量; ε 为很小的正数。

若 $\theta < 1$,则说明该决策单元无效;若 $\theta > 1$,且 $S^+ = S^- = 0$,则称该决策单元有效;若 $\theta \geq 1$,且 $S_i^- \neq 0$ 或 $S_j^+ \neq 0$,则称该决策单元弱有效。在决策单元有

效的情况下进而比较其相对效率值大小。

3.2 Malmquist 指数法

Malmquist 指数可用来分析 t 时期到 $t + 1$ 时期全要素生产水平的变化^[11],具体可分解为:

$$Tfpch = Effch \times Techch \tag{3}$$

式中: $Tfpch$ 为生产率变化指数, $Tfpch > 1$ 表明生产率水平相对上一时期提高,反之则下降; $Effch$ 为技术效率变化指数; $Techch$ 为技术变化指数。 $Effch$ 还可进一步分解为 $Pech$ (纯技术效率变化)和 $Sech$ (规模效率变化),即:

$$Effch = Pech \times Sech \tag{4}$$

3.3 指标选取与数据来源

根据宁夏地区的工业用水现状以及经济发展水平,选取了相应的投入产出指标,见表 1。

表 1 宁夏工业用水投入产出指标体系

投入指标	产出指标
工业耗水量/ 10^8 m^3	工业总产值/ 10^4 元
工业从业人口/ 10^4	废污水排放量/ 10^8 t
固定资产净值/ 10^4 元	

(1)工业耗水量。工业生产中,直接以及间接所消耗的水资源量。

(2)工业从业人员数。从业人员在一定程度上代表了工厂生产规模的大小,提高水资源利用效率需要对劳动力结构合理规划。

(3)固定资产净值。固定资产净值即为固定资产原值减去折旧后的净额,其能更精确地反映水资源利用过程中资本的消耗^[9]。

(4)工业总产值。工业总产值反映了一段时间内工业生产的总规模和总水平。

(5)工业废污水排放量。废污水属于工业生产的非期望产出,过多的排放量不仅会给生态环境带来污染,也会降低工业水资源的利用效率。

本文所选取的数据中,工业耗水量来自于《宁夏水资源公报》,工业从业人员、固定资产净值、工业总产值和废污水排放量均来自于《宁夏统计年鉴》,数据在时间上覆盖 11 a(2006 – 2016 年),在空间上覆盖宁夏 5 个行政区(银川、石嘴山、吴忠、固原和中卫市),共 55 个决策单元。

4 实证分析

4.1 2006 – 2016 年宁夏地区工业用水效率动态分析

本文运用了 EMS 1.3 软件,选用 CCR 模型,在规模报酬不变的条件下以产出为导向,计算了宁夏地区 2006 – 2016 年的工业用水利用效率,见表 2。

表 2 2006 – 2016 年宁夏各行政区工业用水效率

行政区	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	均值
银川	0.782	0.773	0.770	0.722	0.860	0.821	0.898	1.036	1.138	1.136	1.125	0.915
石嘴山	0.522	0.711	0.902	0.784	0.837	0.932	0.973	0.934	0.899	0.891	1.058	0.858
吴忠	0.938	1.049	1.114	0.830	0.884	0.861	0.808	0.873	0.902	0.791	0.821	0.897
固原	1.261	0.886	0.693	0.745	0.809	0.627	0.610	0.592	0.592	0.554	0.376	0.704
中卫	0.786	1.045	1.149	1.213	0.837	1.023	0.999	1.010	0.787	0.860	0.778	0.953
均值	0.858	0.893	0.926	0.859	0.845	0.853	0.858	0.889	0.864	0.846	0.831	0.866

由表 2 可知,2006 – 2016 年全区达到超效率 DEA 有效的决策单元不足 25%,除 2008 年外,每年效率均值变化幅度较小;从各市年均效率值来看,中卫市的工业用水效率最高,固原市最低,其余 3 个市的效率值相差不大。从各市年际变化来看,银川市和石嘴山市呈现逐年波动上升的趋势,并分别于 2013 年和 2016 年达到了超效率 DEA 有效,且银川市在 2014 – 2016 年的效率值呈强有效并较为稳定的状态;而吴忠、固原和中卫的 DEA 由有效变为无效,且固原市下降趋势尤其显著,到 2016 年已跌至 0.376,这与固原市经济发展方式长期以农业为主有关。尽管 2013 年固原市召开“工业强市”大会并有

所行动,但在用水效率方面并未达到预期的效果。中卫市 2006 – 2013 年中有 6 年都达到了 DEA 强有效,且年均效率值最高,说明中卫市在用水效率方面相对其他地区更为成熟,整体呈平稳上升状态,这可能与当时宁夏所实行的水权转换有关,用较少的水量撬动了该地的经济发展,但近几年转变为 DEA 无效,说明该市的资本与劳动力可能存在投入冗余的情况^[9];总体来说,宁夏地区的工业用水效率表现良好,但仍有改善空间。

针对 DEA 无效的决策单元,将 DEAP 2.1 软件所测算的技术效率、规模效率、规模收益以及各投入指标的冗余率进行整理,结果见表 3。

表 3 2006 – 2016 年宁夏各行政区 DEA 无效的效率值及投入要素冗余率

年份	排序	行政区	技术效率	规模效率	规模收益	$Y_1 / \%$	$Y_2 / \%$	$Y_3 / \%$
2006	1	银川	0.795	0.983	drs	15.35	15.22	15.22
	2	石嘴山	0.523	0.998	irs	52.17	27.51	48.90
	3	吴忠	0.938	1.000		20.62	20.11	20.11
	4	中卫	0.798	0.985	irs	10.89	10.89	10.89
2007	1	银川	0.803	0.963	drs	18.47	18.32	18.32
	2	石嘴山	0.712	0.999	drs	50.85	26.15	26.15
	3	固原	1.000	0.886	irs	12.88	12.72	12.72
2008	1	银川	0.814	0.946	drs	17.74	9.33	9.33
	2	石嘴山	0.968	0.932	drs	9.18	9.07	9.07
	3	固原	1.000	0.693	irs	26.19	25.00	25.00
2009	1	银川	0.761	0.948	drs	20.25	20.16	20.16
	2	石嘴山	0.818	0.959	drs	4.58	5.21	4.51
	3	吴忠	0.830	1.000		11.86	11.80	11.80
	4	固原	0.978	0.762	irs	30.43	20.91	20.91
2010	1	银川	0.932	0.923	drs	14.04	10.14	10.14
	2	石嘴山	0.855	0.979	drs	0.00	0.00	0.00
	3	吴忠	1.000	0.884	drs	18.28	18.29	18.29
	4	固原	1.000	0.809	irs	47.06	12.30	12.30
	5	中卫	0.840	0.996	irs	0.00	0.00	0.00
2011	1	银川	0.827	0.992	drs	20.95	18.95	17.30
	2	石嘴山	0.972	0.959	drs	8.83	8.18	2.76
	3	吴忠	0.867	0.993	irs	13.38	13.26	13.26
	4	固原	0.995	0.630	irs	11.76	0.54	7.98
2012	1	银川	0.899	0.999	irs	6.82	27.58	6.78
	2	石嘴山	1.000	0.973	drs	15.28	14.47	14.47
	3	吴忠	0.817	0.989	irs	0.00	0.00	0.00
	4	固原	0.877	0.696	irs	0.00	0.00	0.00
	5	中卫	1.000	0.999	irs	15.84	15.99	15.99
2013	1	石嘴山	0.955	0.978	drs	23.95	36.14	23.90
	2	吴忠	0.882	0.99	irs	40.39	25.20	18.25
	3	固原	0.791	0.749	irs	16.89	17.01	17.01
2014	1	石嘴山	0.907	0.992	drs	0.00	4.75	2.25
	2	吴忠	0.909	0.992	irs	18.59	32.56	18.64
	3	固原	0.750	0.789	irs	10.89	18.31	3.17
	4	中卫	0.798	0.986	irs	0.00	0.00	0.00
2015	1	石嘴山	0.891	1.000		19.74	35.72	19.74
	2	吴忠	0.817	0.968	irs	42.37	33.76	28.83
	3	固原	0.738	0.750	irs	0.00	0.00	0.00
	4	中卫	0.873	0.985	irs	20.50	48.82	20.46
2016	1	吴忠	0.848	0.969	irs	47.63	63.15	47.69
	2	固原	0.725	0.519	irs	6.99	6.21	6.21
	3	中卫	0.799	0.974	irs	33.02	20.21	20.21

注:irs 为规模收益递增,drs 为规模收益递减^[16]; Y_1 、 Y_2 和 Y_3 分别为耗水量、劳动力和固定资产净额冗余率。

由表 3 可知,除固原市外,每年各行政区的规模效率值都接近于 1,且普遍高于技术效率,说明技术效率是降低整个自治区用水效率的主要因素。固原

市 2007 – 2011 年的技术效率均有效,规模效率平均约为 0.7,2012 年之后,虽然技术效率逐渐下滑,但总体仍大于规模效率,且固原市的规模收益一直处

于递增的状态,说明规模效率阻碍了固原市的工业经济发展,应在原定基础上扩大生产规模。

从 2012 - 2016 年投入冗余来看,耗水量、工业从业人口和固定资产净值 3 个指标的冗余量分别占总投入的 12.66%、15.20%、8.95%,表明宁夏工业总体的投入配比及利用状况良好。其中,吴忠市 2013、2015、2016 年的耗水冗余率均超过了 40%,其余两个投入变量的冗余率远超平均水平,尤其在 2016 年,劳动力冗余高达 63.15%,固定资产投资冗余量也接近 50%,中卫市 2015 年的劳动力冗余率为 48.82%,是年均冗余率的 3 倍多,2016 年水资源和固定资产方面的冗余率也都维持在年均冗余的 2 倍左右,说明吴忠和中卫市在组织管理和资源投入方面出现了极大的偏差,考虑两者规模配置已接近成熟,因此应缩减水资源和固定资产的投入,优化劳动力结构,从而提高水资源利用效率。

4.2 2006 - 2016 年宁夏地区工业用水效率静态分析

运用 DEAP 2.1 中的 Malmquist 指数法对宁夏地区 2006 - 2016 年的工业水资源利用效率进行静态分析,见表 4。

表 4 2007 - 2016 年宁夏 Malmquist 指数					
年份	<i>Effch</i>	<i>Techch</i>	<i>Pech</i>	<i>Sech</i>	<i>Tfpch</i>
2007	1.027	1.063	1.042	0.986	1.092
2008	1.031	1.078	1.021	1.010	1.112
2009	1.023	0.893	1.000	1.023	0.913
2010	1.000	1.020	1.000	1.000	1.020
2011	0.984	1.107	1.000	0.984	1.089
2012	0.932	0.997	1.000	0.932	0.930
2013	1.015	0.984	0.996	1.019	0.999
2014	1.024	0.942	0.997	1.027	0.965
2015	1.033	1.050	0.997	1.036	1.085
2016	0.836	0.858	1.004	0.833	0.718
均值	0.989	0.996	1.006	0.983	0.985

由表 4 可知,2007 - 2016 年宁夏地区的全要素生产率年均降低 1.5%,技术效率和技术进步的降低对全要素生产率都有着一定程度的影响,其中技术效率年均降低 1.1%,接近技术进步变化指数的 3 倍,是拉低生产力水平的主要因素;纯技术效率指数年均增长 0.6%,说明宁夏地区的制度建设和管理水平相对较为成熟,相反的,规模效率年均降低 1.7%,降低了整个地区的技术效率变化指数,说明该地区的规模配置问题较为突出。从年际变化来看,纯技术效率指数变化幅度小且较为稳定,其余 4 个指标变化幅度都较大,且皆于 2016 年跌至最低,

全要素生产率较 2015 年降低了 28.2%,说明在 2016 年,无论是技术效率、技术进步还是投资规模方面都出现了严重的偏差,这可能是由于 2016 年宁夏地区进行工业改革,未处理好资源分配的衔接和相关产业的调整。2012 年之后,技术进步指数基本上一一直处于下跌状态,说明宁夏地区需要进行技术创新,进而提高其全要素生产率。

宁夏各行政区的 Malmquist 指数值呈现出较为显著的区域差异,见表 5 和图 1。

表 5 宁夏各行政区 Malmquist 指数					
行政区	<i>Effch</i>	<i>Techch</i>	<i>Pech</i>	<i>Sech</i>	<i>Tfpch</i>
银川	1.000	1.081	1.000	1.000	1.081
石嘴山	1.041	0.998	1.031	1.009	1.039
吴忠	0.987	1.012	0.997	0.990	0.999
固原	0.920	0.945	1.000	0.920	0.869
中卫	1.000	0.951	1.000	1.000	0.951

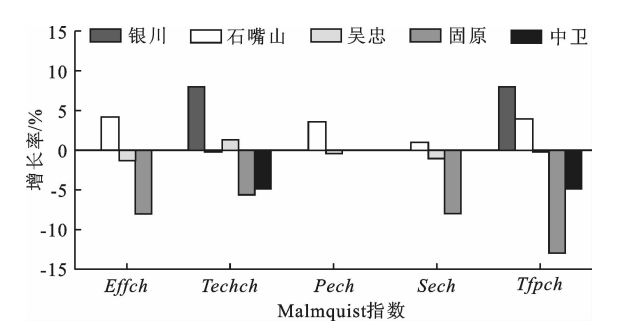


图 1 宁夏各行政区 Malmquist 指数增长率

由表 5 和图 1 可知,从全要素生产率指数来看,银川和石嘴山市为正增长,吴忠市近似于不变,而固原和中卫市为负增长,其中固原市降低了 13.1%,说明固原市的投资水平和生产力处于严重落后的状态;从分解后的各个指标来看,各行政区的纯技术效率都较为成熟,银川和石嘴山市表现较好,基本上都在快速增长,吴忠市总体来说相对良好,技术进步明显,但技术效率和规模效率方面仍有改善空间,中卫市主要问题在于技术进步,应着重于引入先进的技术和设备,固原市除纯技术效率之外都在急速降低,其中规模效率和技术进步是影响全要素生产率的两大主要因素,进一步说明了固原市技术水平的落后和规模效率的低下,因此要想提高宁夏地区的生产力水平,固原市是关键。

5 结论及建议

5.1 结 论

本文基于超效率 DEA 模型和 Malmquist 指数

法,利用宁夏回族自治区 2006—2016 年的工业耗水量、从业人员、固定资产净值、工业总产出和废污水排放量对全区的工业水资源利用效率进行了评价,分析结果表明:

(1)从超效率 DEA 模型来看,宁夏地区的工业水资源利用效率总体良好,技术效率是降低整个地区用水效率的主要因素;各行政区中,固原市的用水效率最为落后,其中规模效率是关键,石嘴山市的组织管理和规模设计较为成熟,但工业技术方面有所欠缺,2013 年后,吴忠和中卫市各指标出现了不同程度的冗余,劳动力冗余最为严重。

(2)从 Malmquist 指数来看,宁夏地区全要素生产率的降低主要归咎于技术效率变化指数;各个分解指标中,纯技术效率指数值较为稳定,2016 年因工业企业进行调整,全区的技术水平和规模效率迅速下跌;各行政区中,银川和石嘴山市生产力水平快速增长,吴忠市较为稳定,中卫市技术水平退步,固原市的技术落后且规模效率低下,与动态分析所得结果基本一致。

5.2 建议

(1)宁夏回族自治区应高度重视工业水资源的有效利用和合理规划,调配好各市工业用水的比例,加大节水力度,坚持以发展技术为主线,引进先进的技术和设备,加强企业技术水平与高校科研的有机结合,并将科研成果应用到企业发展之中,从而提高全区的工业水资源利用效率。

(2)有针对性的改进各市工业用水效率,固原市应着重于积极调整产业布局,扩大工业生产规模和提高技术水平;吴忠和中卫市应适当缩减各方面资源的投入,统筹考虑工业生产过程中各个投入指标的配比关系,要重视工人的素质,优化劳动力结构,从而使得投入和产出达到最优状态。

参考文献:

- [1] 张浩文. 兰州市水资源利用效率研究[D]. 兰州:西北师范大学, 2012.
- [2] 李少忠,许丽萍. 机械制造业机电一体化发展研究[J]. 科技风, 2019(22):142.
- [3] 王建香. 加强工业园污水处理工程环境监理的几点思考[J]. 资源节约与环保, 2015(3):186.
- [4] 李志敏,廖虎昌. 中国 31 省市 2010 年水资源投入产出分析[J]. 资源科学, 2012, 34(12):2274—2281.
- [5] 刘东,齐晓晨,朱伟峰. 基于 CSCI—GRA 模型的区域农业水土资源复合系统恢复力评价指标体系优选[J]. 东北农业大学学报, 2019, 50(1):59—67.
- [6] 魏邦龙,白天志,冯中毅,等. 甘肃省水资源区域优势综合评价与分析[J]. 节水灌溉, 2005(4):16—18.
- [7] 刘庆生. 浙江省水资源利用效率研究[J]. 水利经济, 2010, 28(2):28—30+76.
- [8] 赵晨,王远,谷学明,等. 基于数据包络分析的江苏省水资源利用效率[J]. 生态学报, 2013, 33(5):1636—1644.
- [9] 王莹. 基于 DEA 的江苏省工业水资源利用效率研究[J]. 水利经济, 2014, 32(5):19—22+72.
- [10] 买亚宗,孙福丽,石磊,等. 基于 DEA 的中国工业水资源利用效率评价研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(11):42—47.
- [11] 赵晓霞,傅春,王宫水. 基于超效率 DEA Malmquist 指数的长江流域绿色发展效率评价[J]. 生态经济, 2019, 35(8):46—49+110.
- [12] 王学渊. 基于 DEA 和 SFA 方法的中国省区灌溉用水效率比较研究[J]. 统计与决策, 2010(8):44—47.
- [13] 张兆方,沈菊琴,何伟军,等. “一带一路”中国区域水资源利用效率评价——基于超效率 DEA—Malmquist—Tobit 方法[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2018, 20(4):60—66+92—93.
- [14] 孙付华,陈汝佳,张兆方. 基于三阶段 DEA—Malmquist 区域农业水资源利用效率评价[J]. 水利经济, 2019, 37(2):53—58+78+87—88.
- [15] 王艳秋,徐晓庆. 基于超效率 DEA 的石油化工企业生态效率评价研究[J]. 经济研究导刊, 2017(20):17—19.
- [16] 龙岩,李有明,孔令仲,等. 基于数据包络分析的突发水污染事件应急调控后评价研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(5):154—158.
- [17] 范秋芳,王丽洋. 中国全要素能源效率及区域差异研究——基于 BCC 和 Malmquist 模型[J]. 工业技术经济, 2018, 37(12):61—69.
- [18] 段海啸. 基于 SBM 方向性距离函数的中国农村水利设施投入产出效率研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(4):236—240.
- [19] 杨明明,武鹏林. 基于考虑非期望产出的超效率 SBM—Malmquist 模型的水利建设投资效率评价[J]. 水电能源科学, 2019, 37(3):128—131.
- [20] 王腾,梁晶. 基于非期望产出超效率 SBM 模型的港口能源效率评价[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2018, 42(4):637—641.
- [21] 岳立,白婧,郭山宁. 基于超效率的中国工业用水效率分析[J]. 石家庄经济学院学报, 2013, 36(6):51—55.
- [22] 杨咪,屈文岗,钱会. 基于熵权的贝叶斯模型及其在水质评价中的应用[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(1):85—90.
- [23] 王永良,唐莲,张静,等. 宁夏沿黄经济区水资源短缺与社会适应能力耦合关系分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(6):245—249.