

# 2011—2020年山东省水资源利用效率及动态分析

姜德娟<sup>1,3</sup>, 李丽娟<sup>2</sup>

1. 中国科学院烟台海岸带研究所 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东 烟台 264003;
2. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环与地表过程重点实验室, 北京 100101;
3. 山东省海岸带环境过程重点实验室, 山东 烟台 264003)

**摘要:** 为进一步提升水资源利用效率, 结合用水效率指标及数据包络分析法( DEA) 和 Malmquist 指数法对 2011—2020 年山东省 16 个地市的水资源利用效率进行了定性和定量评估。结果表明: 山东省用水效率相对全国总体偏高, 但存在区域发展不均衡等特点。无论农业、工业还是综合用水水平, 胶东半岛用水效率均为全省最高( 尤其是青岛市), 其次为鲁中, 再次为鲁南, 鲁西北用水效率最低( 尤其是滨州和聊城市)。全省有 8 个地市( 济南、青岛、淄博、烟台、济宁、威海、日照和菏泽市) DEA 达到有效, 且规模和技术均有效, 其他 8 个地市未达到 DEA 有效, 尤其是聊城市水资源综合利用效率为全省最低。2011—2020 年期间, 山东省全要素生产率(TFP) 变化指数平均升高 8.2%, 用水效率整体呈上升趋势, 主要受到技术进步增长的影响; 其中胶东半岛的青岛、烟台和威海市增长幅度最大, 均超过 10%。但自 2014 年以来, 全省 TFP 指数总体呈下降趋势, 甚至于 2019—2020 年降低至 1 以下, 因此水资源利用效率亟待提升。未来山东省有必要加大科技投入, 促进技术创新, 适当控制鲁西北和鲁南地区的生产规模, 并加快非常规水资源的利用水平, 保障水资源的可持续利用和经济社会的高质量发展。

**关键词:** 水资源利用效率; 动态分析; DEA 模型; Malmquist 指数; 山东省

**中图分类号:** TV213.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2023)03-0010-09

## Analysis of water use efficiency and its dynamics in Shandong Province during 2011 – 2020

JIANG Dejuan<sup>1,3</sup>, LI Lijuan<sup>2</sup>

1. CAS Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Shandong Key Laboratory of Coastal Environmental Processes, Yantai 264003, China)

**Abstract:** In order to further enhance the water use efficiency (WUE), four WUE indicators as well as the data envelopment analysis (DEA) model and Malmquist index were combined to evaluate the WUE of 16 cities in Shandong Province during 2011 – 2020. The results showed that the WUE in Shandong Province was overall higher than that of China, but its development was unbalanced in different cities of the province. The agricultural, industrial and comprehensive water use levels in Jiaodong Peninsula were the highest among Shandong Province (especially Tsingtao City), followed by central Shandong Province, then southern Shandong Province, and northwestern Shandong Province ranked lowest (especially Binzhou and Liaocheng cities). The DEA was effective for 8 cities (Jinan, Tsingtao, Zibo, Yantai, Jinan, Weihai, Rizhao and Heze) in terms of scale and technology; whereas the other 8 cities could not achieve the DEA effectiveness, among which Liaocheng City had the lowest WUE over the whole province. Furthermore, the total factor productivity (TFP) change index of Shandong Province has increased

收稿日期:2022-12-05; 修回日期:2023-06-07

基金项目:国家自然科学基金项目(72050001);山东省自然科学基金项目(ZR2022ME100)

作者简介:姜德娟(1979—),女,山东日照人,博士,副研究员,硕士生导师,研究方向为海岸带环境水文过程与模拟。

通讯作者:李丽娟(1961—),女,吉林吉林人,博士,研究员,博士生导师,研究方向为水文与水资源。

by 8.2% on average from 2011 to 2020, suggesting that the WUE in Shandong Province showed an upward trend mainly due to the increase in the technological progress. Particularly, the TFP index has increased by more than 10% in Tsingtao, Yantai and Weihai cities. However, it has overall declined since 2014 over the whole province, which even dropped to less than one during 2019 – 2020. Therefore, the WUE of Shandong Province needs to be improved urgently in the near future. In order to ensure the sustainable utilization of water resources and the high-quality development of economic society, it is suggested that the investment in science and technology should be strengthened and the technological innovation should be promoted in Shandong Province. In addition, it is necessary to reasonably control the production scale in northwestern and southern Shandong Province and to promote the use of unconventional water resources.

**Key words:** water use efficiency; dynamic analysis; data envelopment analysis (DEA) model; Malmquist index; Shandong Province

## 1 研究背景

水资源是经济社会发展的基础性和战略性资源。一方面,随着经济社会的快速发展、城市化的迅速扩张、人们生活水平的不断提高,人类对水资源的需求量日益增长,导致水资源短缺,制约了经济社会的发展。而另一方面,水资源浪费和低效利用现象普遍存在,阻碍了水资源利用效率的提高和经济社会的持续发展。科学评价用水效率,对有效提升用水效率、落实严格的水资源制度、解决水资源紧缺以及促进区域可持续发展具有重要意义<sup>[1-6]</sup>。近年来,关于水资源利用效率评价的研究逐渐增多,且多集中于国内,常采用的方法包括指标体系评价法(如云模型、模糊物元法、主成分分析法等)、比值分析法、数据包络分析法(data envelopment analysis, DEA)及其拓展模型(如非期望超效率SBM(slacks based measure)模型)<sup>[2,6-13]</sup>,这些方法可结合水资源与相关社会经济生产要素,并从投入产出角度全面衡量水资源利用效率<sup>[8]</sup>。其中,DEA模型凭借其无需确定权重、统一量纲、估计生产函数,以及便捷、灵活、操作性强等优势而得到广泛应用<sup>[5-7,13-16]</sup>。如Pan等<sup>[4]</sup>、胡妍等<sup>[7]</sup>、庞庆华等<sup>[14]</sup>、何楠等<sup>[15]</sup>、钱文婧等<sup>[17]</sup>、武翠芳等<sup>[18]</sup>均采用DEA模型并结合Malmquist指数分析法对全国及区域或流域的水资源利用效率进行了评价。

山东省是我国人口第二大省,也是我国农业和工业大省,GDP总量位居全国第三,在全国发展大局中的地位日益突出。而且,山东省地处黄河下游,是黄河流域经济最发达的省份,在黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略布局中具有重要地位。但水资源匮乏一直制约着该省的经济社会发展,山东省人

均水资源量为380.3 m<sup>3</sup>(2020年),仅为全国平均水平(2 239.8 m<sup>3</sup>)的1/6,且水资源年际变化大、时空分布不均,造成了山东省紧张的水资源形势。正确测度用水效率,全面提升水资源节约集约利用水平是山东省水资源和经济持续发展的突破点。目前,关于山东省用水效率的评价研究多采用DEA模型,但研究时期较早且结果相差较大(如Pan等<sup>[4]</sup>、栾健等<sup>[19]</sup>、钟磊等<sup>[20]</sup>、段长桂等<sup>[21]</sup>、邓兆远<sup>[22]</sup>)。因此,本文基于2011—2020年数据资料并结合用水效率指标和DEA-Malmquist模型,对山东省16个地市的水资源利用效率进行定性和定量评估,研究结果将为节水潜力的深入挖掘和用水效率的有效提升以及经济社会的高质量发展提供决策支持。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

本研究所采用的用水总量、农业用水量、工业用水量、生活用水量、生态用水量等数据来自2011—2020年《山东省水资源公报》。人口、GDP、工业增加值、农业增加值、从业人员数、固定资产投资额、COD排放量、NH<sub>3</sub>-N排放量等数据来自2011—2020年《山东省统计年鉴》。为去除价格变动对各项数据的影响,本文基于价格指数计算了以2011年为基准期的实际GDP、工业增加值、农业增加值和固定资产投资额。

### 2.2 研究方法

首先,应用万元GDP用水量、万元工业增加值用水量、万元农业增加值用水量和人均综合用水量4个指标从产业及综合方面对山东省16个地市的水资源利用效率进行评价。为体现区域差异性,将全省分为4个区域进行比较分析,分别为胶东半岛(青岛市、烟台市、威海市)、鲁中(济南市、淄博市、

潍坊市、泰安市)、鲁南(临沂市、日照市、枣庄市、济宁市、菏泽市)和鲁西北(东营市、滨州市、德州市、聊城市)。

其次,采用 DEA 模型对山东省用水效率进行定量评估。该方法是由美国逻辑学家 Charnes 等于 1978 年提出的,可评价多输入、多产出的效率问题<sup>[13-15,23]</sup>。DEA 包含 CCR 和 BCC 两种模型<sup>[4,19]</sup>,本文选取以投入导向为特点的 BCC 模型对山东省 16 个地市的用水效率进行测算。模型输入的投入指标包括固定资产投资额、从业人员数、各部门用水量(农业、工业、生活和生态)、COD 排放量、NH<sub>3</sub>-N 排放量,产出指标为 GDP。

DEA - BBC 模型的计算公式如下:

$$\min[\theta - \varepsilon(\sum_{i=1}^m S^- + \sum_{r=1}^s S^+)]$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j X_j + S^- = \theta X_0 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j Y_j - S^+ = Y_0 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \\ \lambda_j, S^-, S^+ \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\theta$ 为投入与产出的相对效率值,当 $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$ 时,

$\theta$ 为纯技术效率,当 $\sum_{j=1}^n \lambda_j \neq 1$ 时, $\theta$ 为技术效率; $\varepsilon$ 为非阿基米德无穷小量; $S^-$ 、 $S^+$ 分别为投入和输出的松弛变量; $\lambda_j$ 为第 $j$ 个决策单元(decision making unit, DMU)的投入和产出权重; $X_j$ 为第 $j$ 个 DMU 的投入向量; $Y_j$ 为第 $j$ 个 DMU 的产出向量; $m$ 为投入向量个数; $s$ 为产出向量个数; $n$ 为 DMU 个数。

最后,应用 Malmquist 指数分析法对山东省用水效率的时间动态进行分析。该方法是由 Malmquist 提出后经 Caves、Bhristensen 等改进用于生产效率变化测算的一种常用方法<sup>[18]</sup>,其计算公式如下:

$$m_0(x_t, y_t, x_{t+1}, y_{t+1}) = \left[ \frac{d_0^t(x_{t+1}, y_{t+1})}{d_0^t(x_t, y_t)} \cdot \frac{d_0^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})}{d_0^{t+1}(x_t, y_t)} \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中: $m_0$ 为 $t$ 时期到 $t+1$ 时期的 Malmquist 全要素生产率(total factor productivity, TFP)变化指数( $Tfpch$ ); $(x_t, y_t)$ 和 $(x_{t+1}, y_{t+1})$ 分别表示 $t$ 时期和 $t+1$ 时期的投入产出向量; $d_0^t(x_t, y_t)$ 和 $d_0^t(x_{t+1}, y_{t+1})$ 分别表示 $t$ 时期和 $t+1$ 时期投入产出向量的距离函数。当 $Tfpch$ 指数大于1时,说明相较上一时期

全要素生产率水平提高,小于1则表示下降。

可将用水效率 $Tfpch$ 指数分解为综合技术效率( $Effch$ )和技术进步效率( $Techch$ ),即 $Tfpch = Techch \times Effch$ 。 $Techch$ 表示由 $t$ 时期到 $t+1$ 时期 DMU 生产技术的改变及创新程度; $Effch$ 表示由 $t$ 时期到 $t+1$ 时期综合技术效率的相对变化<sup>[7]</sup>,其可进一步分解为纯技术效率( $Pech$ )和规模效率( $Sech$ ),即 $Effch = Pech \times Sech$ 。 $Pech$ 为1表示以当前的技术水平投入生产,可以有效地使用生产要素<sup>[14]</sup>; $Sech$ 反映投资规模的有效利用程度<sup>[7]</sup>。

### 3 结果分析

#### 3.1 用水效率指标分析

从万元 GDP 用水量、万元工业增加值用水量、万元农业增加值用水量和人均综合用水量 4 个指标分析山东省全省及各区域水资源利用效率,2011—2020 年山东省各区域用水效率指标的年际变化如图 1 所示;2020 年山东省各地市用水效率指标空间分布如图 2 所示(以 16 个地市为单位)。

3.1.1 万元 GDP 用水量 万元 GDP 用水量是一项综合用水效率指标,能反映国家、地区或行业经济的用水状况、用水效率变化和节水发展成就<sup>[9,24]</sup>。由图 1(a)可见,2011—2020 年山东省万元 GDP 用水量明显减少,由 2011 年的 51.1 m<sup>3</sup> 减少至 2020 年的 26.7 m<sup>3</sup>,年均削减量为 6.85%。图 3、4 分别给出了 2011—2020 年山东省产业结构和 GDP 的变化情况,综合分析认为,山东省全省产业结构不断调整,第三产业迅速发展(图 3),经济持续增长(图 4),使万元 GDP 用水量逐渐减少并远低于全国平均水平(57.2 m<sup>3</sup>),表明山东省综合用水效率相对全国较高。但受自然资源禀赋、经济社会发展水平、产业结构与空间布局以及节水技术等因素的影响,全省万元 GDP 用水量表现出较大的区域差异。由图 1(a)中各区域来看,胶东半岛万元 GDP 用水量在全省最低,2020 年为 9.5 m<sup>3</sup>,其中青岛市仅 7.8 m<sup>3</sup>(图 2(a));其次为鲁中地区,万元 GDP 用水量也较低,2020 年为 22.3 m<sup>3</sup>。相比较而言,鲁南和鲁西北万元 GDP 用水量较高,均超过全省平均水平,特别是鲁西北地区,2020 年万元 GDP 用水量高达 54.9 m<sup>3</sup>,是胶东半岛的近 6 倍。其中,聊城市万元 GDP 用水量在全省最高,达 71.9 m<sup>3</sup>(图 2(a)),约为青岛市的 9 倍。上述结果说明胶东半岛综合用水效率最高,鲁西北最低,主要因为鲁西北农业和工业用水效率均较低(图 1(b)、1(c))。

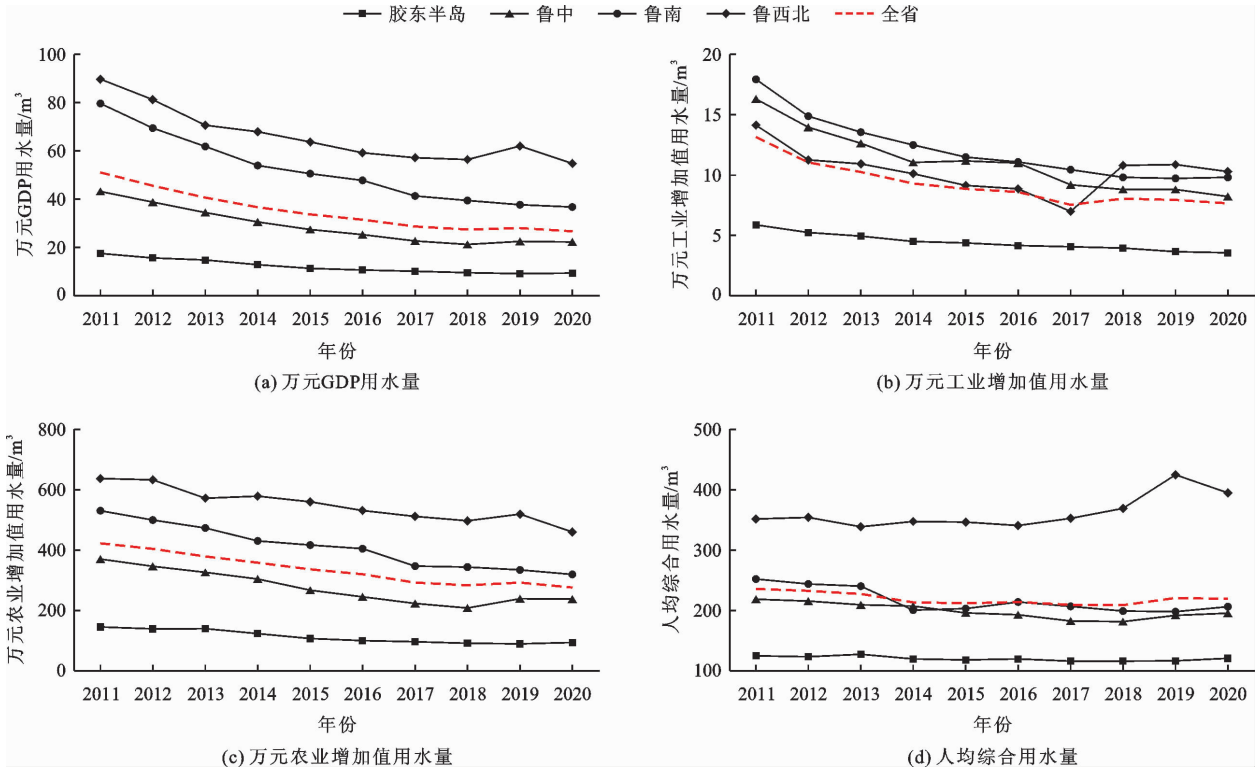


图1 2011—2020年山东省用水效率指标的年际变化

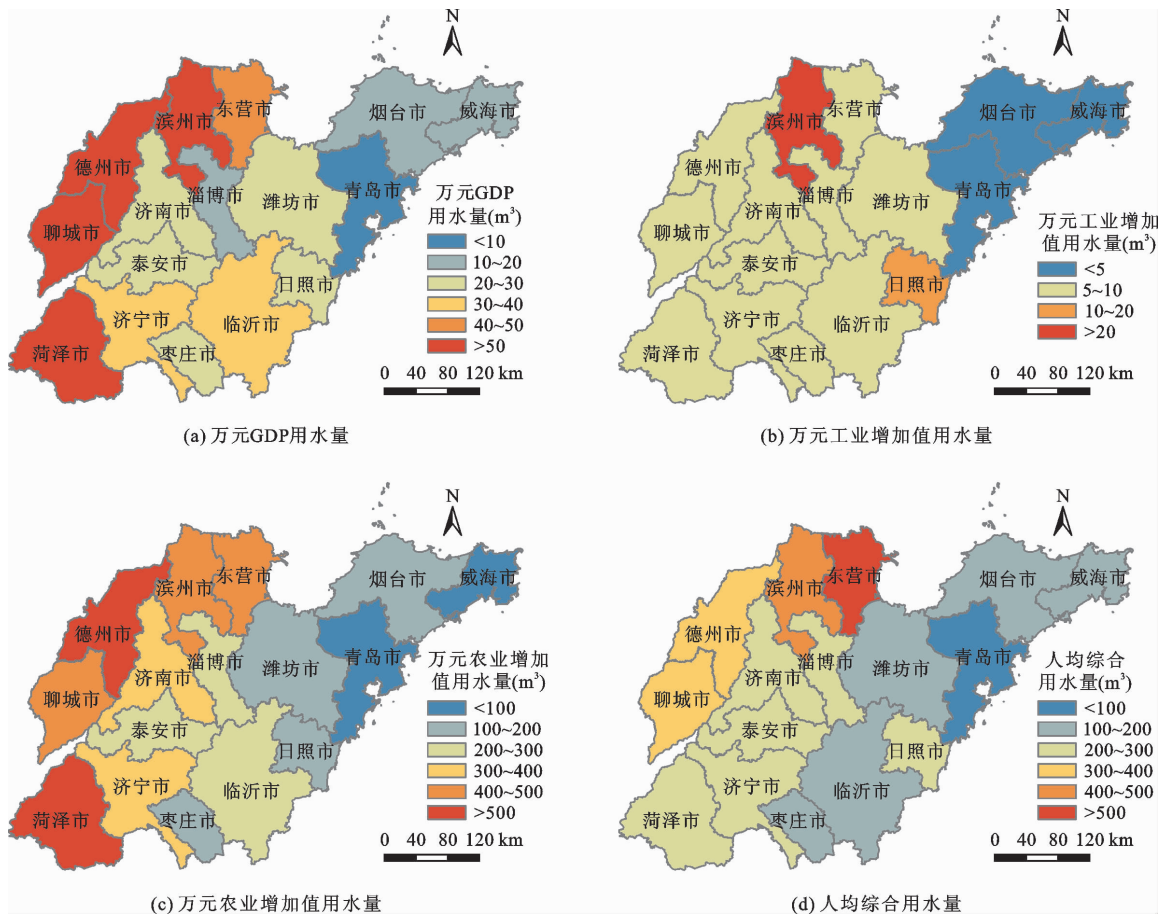


图2 2020年山东省用水效率指标空间分布

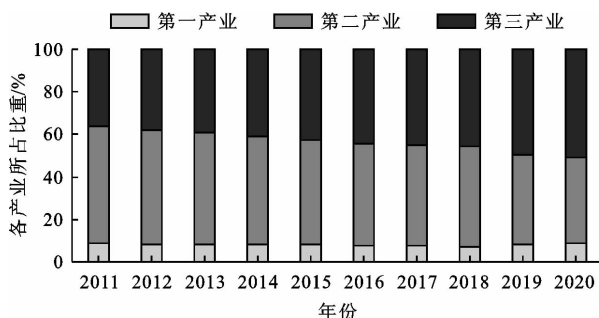


图3 2011—2020年山东省产业结构

3.1.2 万元工业增加值用水量 万元工业增加值用水量是表征工业用水水平较为直观的一项指标,可体现水资源作为生产要素在工业生产中的经济价值产出<sup>[9,25]</sup>。由图1(b)可见,2011—2020年山东省万元工业增加值用水量均低于全国平均水平(32.9 m<sup>3</sup>),总体表现为减少趋势,2020年全省万元工业增加值用水量为7.7 m<sup>3</sup>。其区域差异特征与万元GDP用水量相似,2020年胶东半岛万元工业增加值用水量也为最低(3.6 m<sup>3</sup>),其中烟台市仅2.7 m<sup>3</sup>(图2(b));其次为鲁中、鲁南;鲁西北最高。2020年鲁西北万元工业增加值用水量为10.3 m<sup>3</sup>,约是胶东半岛的3倍,说明鲁西北工业用水水平在全省相对较低。其中,滨州市万元工业增加值用水量在全省最高,为22.4 m<sup>3</sup>(图2(b))。

3.1.3 万元农业增加值用水量 由图1(c)可见,2011—2020年山东省万元农业增加值用水量明显减少,由2011年的422.1 m<sup>3</sup>减少至2020年的276.0 m<sup>3</sup>,年均削减量为4.56%,且一直低于全国平均水平(464.6 m<sup>3</sup>)。其中,胶东半岛农业用水效率最高,2020年万元农业增加值用水量为94.2 m<sup>3</sup>,远低于全国平均水平,尤其青岛市仅为64.0 m<sup>3</sup>(图2(c));其次为鲁中和鲁南,万元农业增加值用水量分别为237.8和319.1 m<sup>3</sup>,说明这两个地区农业用水效率也较高。鲁西北农业用水效率最低,万元农业增加值用水量为459.9 m<sup>3</sup>,约为胶东半岛的5倍,其中,德州市万元农业增加值用水量高达526.4 m<sup>3</sup>(图2(c)),超过全国平均水平,其次为聊城市和滨州市,万元农业增加值用水量分别为438.0和411.9 m<sup>3</sup>,因此不论农业还是工业方面,滨州市用水水平在全省均较低,需加大农业和工业节水力度。

3.1.4 人均综合用水量 人均综合用水量可以衡量一个地区人均用水量水平的高低<sup>[9]</sup>。由图1(d)可知,2011—2020年山东省人均综合用水量总体呈减少趋势,但降幅不大,由2011年的235.9 m<sup>3</sup>减少至2020年的219.2 m<sup>3</sup>,年均削减量仅为0.77%。

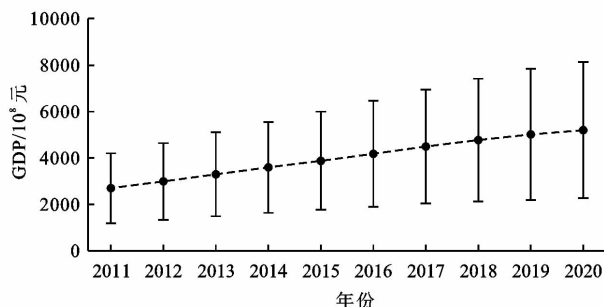


图4 2011—2020年山东省GDP变化

人均综合用水量的区域差异特征与万元GDP用水量相似,胶东半岛最低,2020年为120.9 m<sup>3</sup>,其中青岛市仅为99.8 m<sup>3</sup>(图2(d))。鲁中和鲁南基本相当,人均综合用水量均在200 m<sup>3</sup>左右。鲁西北最高,为394.9 m<sup>3</sup>,其中东营市和滨州市分别为671.5和424.8 m<sup>3</sup>(图2(d))。

### 3.2 DEA-Malmquist模型评估分析

表1为2011—2020年山东省16地市水资源利用效率平均值。首先对表1中的综合效率、技术效率、规模效率分别进行分析,再应用Malmquist指数分析法进行用水效率动态分析。

表1 2011—2020年山东省16地市水资源利用效率平均值

地市	综合效率	技术效率	规模效率	规模收益	结果
济南市	1	1	1	不变	DEA有效
青岛市	1	1	1	不变	DEA有效
淄博市	1	1	1	不变	DEA有效
枣庄市	0.924	1	0.924	递增	非DEA有效
东营市	0.855	1	0.855	递增	非DEA有效
烟台市	1	1	1	不变	DEA有效
潍坊市	0.878	0.888	0.988	递减	非DEA有效
济宁市	1	1	1	不变	DEA有效
泰安市	0.810	0.980	0.827	递增	非DEA有效
威海市	1	1	1	不变	DEA有效
日照市	1	1	1	不变	DEA有效
临沂市	0.880	0.940	0.937	递增	非DEA有效
德州市	0.859	0.907	0.947	递增	非DEA有效
聊城市	0.740	0.870	0.850	递增	非DEA有效
滨州市	0.923	1	0.923	递增	非DEA有效
菏泽市	1	1	1	不变	DEA有效
全省平均值	0.929	0.974	0.953		

3.2.1 综合效率 2011—2020年山东省用水综合效率平均值为0.929,虽未达到DEA有效,但已非

常接近1,进一步说明山东省用水效率整体较高,但也存在一定的提升空间。其中,济南、青岛、淄博、烟台、济宁、威海、日照和菏泽市的综合效率均为1,用水效率达到了DEA有效,且技术与规模均有效,说明这8个地市的投入产出均达到最佳状态,水资源利用效率较高。其他8个地市(枣庄、东营、潍坊、泰安、临沂、德州、聊城和滨州市)的综合效率均为非DEA有效,说明这些地市用水效率较低。其中,聊城市综合效率最低,仅为0.740,而且鲁西北其他地市(东营、德州和滨州市)综合效率也低于1,说明鲁西北用水效率在全省最低,这与前文基于指标分析的结果是一致的。

**3.2.2 技术效率** 从技术效率来看,全省平均值为0.974,说明山东省用水技术仍有提升空间。其中,11个地市技术效率为1,达到技术有效,表明这些地水资源组合达到最优,技术效率最高。潍坊、泰安、临沂、德州和聊城市的技术效率均小于1,说明这些地市在用水技术方面仍有待提升,生产要素的投入结构也需优化。聊城市技术效率在全省最低,仅为0.870,意味着聊城市用水技术明显落后,这也是造成聊城市用水效率居全省最低的重要原因之一。因此聊城市亟待加强水资源优化配置,尤其应改变传统的灌溉方式,减少水资源的浪费,加快用水效率的提升。

**3.2.3 规模效率** 从规模效率来看,全省平均值为0.953,总体较高。其中,济南、青岛、淄博、烟台、济宁、威海、日照和菏泽市的规模效率与综合效率一致,均为1,说明这8个地市的水资源配置达到效率最优,生产规模可继续保持或进一步扩大。其他8个地市规模效率低于1,表明这些地市投资规模过大,基本生产要素调配不合理,导致生产率降低。其中有7个地市(枣庄、东营、泰安、临沂、德州、聊城和滨州市)为规模效率递增,表明这些地市可通过优化用水规模效率拉动产出增加。而潍坊市为规模效率递减,应缩小投资规模,通过降低生产成本进一步提高水资源利用效率。另外,泰安市因地形结构复杂,不利于规模化生产,规模效率在全省最低,进而导致用水效率位居全省倒数第二,因而需大幅降低生产规模,提高水资源利用效率。

**3.2.4 用水效率动态分析** 表2为2011—2020年山东省16地市全要素生产率(TFP)变化指数及分解效率。由表2可见,2011—2020年山东省全省TFP变化指数平均值为1.082,而且所有地市的TFP变化指数均大于1,说明2011—2020年山东省全省及各地市的用水效率呈上升趋势。其中,青岛市、烟

台市和威海市TFP变化指数增加幅度较大,分别为12.7%、24.1%和12.6%。

表2 2011—2020年山东省16地市TFP变化指数及分解效率

地市	综合技术效率	技术进步	纯技术效率	规模效率	TFP变化指数
济南市	1	1.076	1	1	1.076
青岛市	1	1.127	1	1	1.127
淄博市	1	1.071	1	1	1.071
枣庄市	0.993	1.096	1	0.993	1.089
东营市	1	1.078	1	1	1.079
烟台市	1	1.241	1	1	1.241
潍坊市	0.968	1.057	0.972	0.995	1.023
济宁市	0.995	1.056	0.996	0.999	1.051
泰安市	1.006	1.047	1.002	1.004	1.054
威海市	0.997	1.129	1	0.997	1.126
日照市	0.978	1.086	1	0.978	1.062
临沂市	0.997	1.041	0.992	1.005	1.038
德州市	0.998	1.086	1.011	0.988	1.084
聊城市	0.988	1.081	1.013	0.976	1.068
滨州市	0.984	1.072	0.996	0.988	1.056
菏泽市	1	1.079	1	1	1.079
全省平均值	0.994	1.088	0.999	0.995	1.082

由表2中TFP变化指数的各分解效率来看:(1)济南、青岛、淄博、东营、烟台、泰安和菏泽市的综合技术效率均等于或大于1,且同时达到了技术有效和规模有效。其他城市综合技术效率虽然也接近1,但仍存在提升空间;(2)全省所有地市技术进步均大于1,说明山东省用水技术水平不断提升,水资源浪费逐渐降低,用水效率逐步提高。尤其是枣庄、威海、日照、德州和聊城等地市,虽然规模效率降低,但技术进步对水资源利用效率起到了明显的促进作用,使TFP变化指数呈增加趋势;(3)山东省大部分地市纯技术效率等于或大于1,说明山东省技术效率明显增加。潍坊、济宁和滨州市纯技术效率小于1,且规模效率也小于1,但技术进步的增长可以弥补水资源利用技术与管理方面的不足,使得TFP变化指数也呈上升趋势;(4)山东省16地市的规模效率均围绕1波动,其中有8个地市(济南、青岛、淄博、东营、烟台、泰安、临沂和菏泽市)的规模效率呈上升趋势,说明通过增加水资源等投入可提升当地GDP。另8个地市(枣庄、潍坊、济宁、威海、日照、德州、聊城和滨州市)的规模效率呈下降趋

势,表明这些地市增加生产规模会抑制用水效率。其中聊城市规模效率最低(0.976),水资源利用水平亟待提升。

## 4 讨论

### 4.1 用水效率时间变化分析

用水效率指标和 DEA - Malmquist 模型评估结果均显示:2011—2020 年山东省用水效率总体在提高,主要受技术进步增长的显著影响(表 2),这与之前的相关研究结果一致<sup>[19-20]</sup>。其中,2011—2012 年和 2019—2020 年技术进步和 TFP 指数均小于 1,说明该两个时段内山东省水资源利用技术进步未有明显提高,水资源利用呈现衰退态势。其他时期技术进步均为增长趋势,促进了 TFP 指数的增加。2013—2014 年,技术进步达到最高,TFP 指数也达

到最大。但在其之后,TFP 指数总体下跌,主要因为技术进步增加缓慢,抑制了 TFP 指数的增长。总的来说,当前山东省达到 DEA 有效、技术有效和规模有效的地市约为 2011—2012 年的 2~3 倍<sup>[19-20]</sup>,这主要得益于经济条件的改善以及生产效率和环境效益的提升,具体分析如下:

(1)为改善水资源短缺困境、推动经济社会高质量发展,山东省近年来加快推进新旧动能转换,全面推动产业绿色转型。图 5 为 2011—2020 年山东省人均 GDP 及三产业在 GDP 中所占比重的变化趋势。图 5 显示,全省第三产业增加值占比显著升高,第二产业增加值占比显著下降,第一产业增加值占比也有所降低,由此大大降低了全省万元 GDP 用水量和万元工、农业增加值用水量(图 1),提高了水资源综合利用效率。

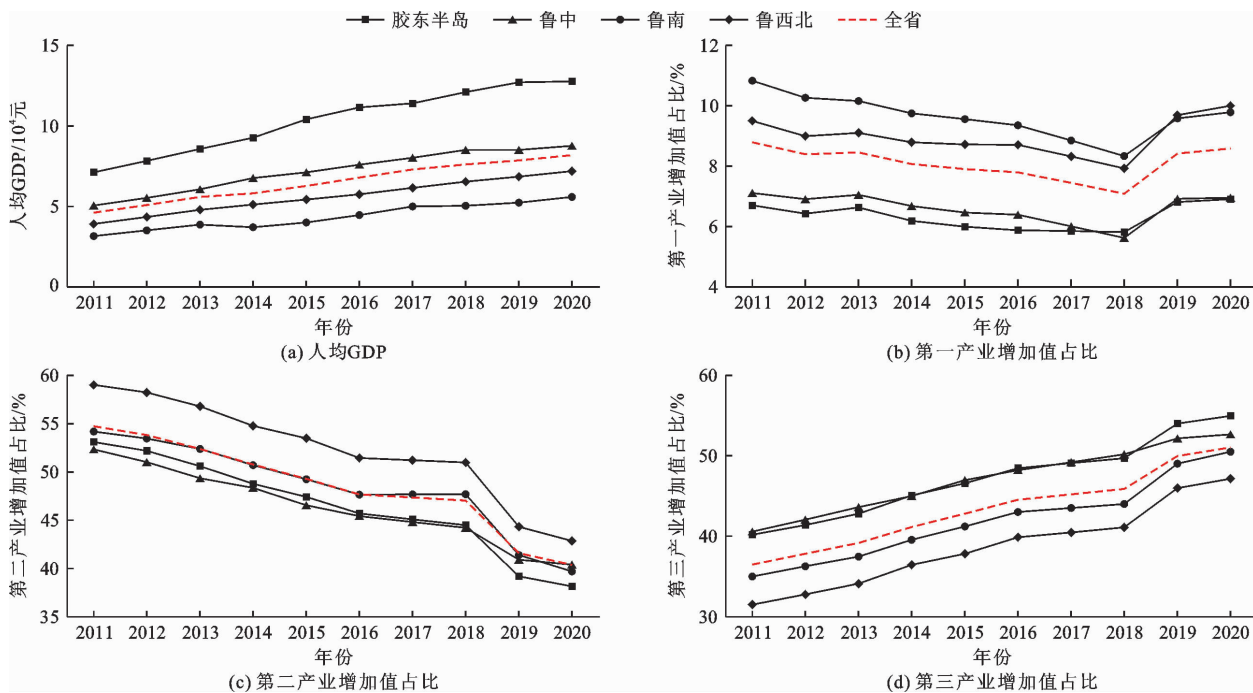


图 5 2011—2020 年山东省人均 GDP 及三产业在 GDP 中所占比重的变化趋势

(2)山东省严守水资源管理“三条红线”,大力发展农业和工业节水,全面建设节水型社会。农业上,不断推动渠道防渗、喷灌滴灌技术等节水灌溉措施的应用<sup>[26]</sup>;工业上,不断加强重点用水行业、企业的节水技术改造,使全省各部门用水结构发生了改变(图 6),全省农业用水占比以及万元 GDP 用水量、万元工业增加值用水量、万元农业增加值用水量均表现为减少态势(图 1、6),2020 年规模以上工业企业用水重复利用率达到 92%,明显促进了用水效率的提升。

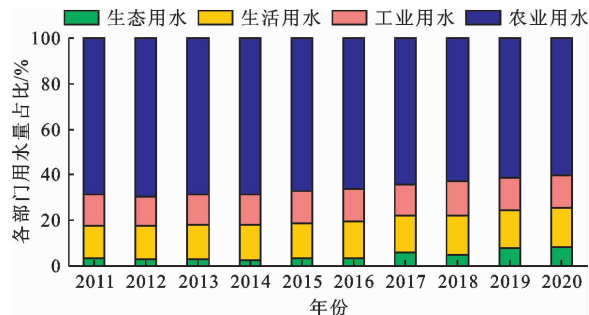
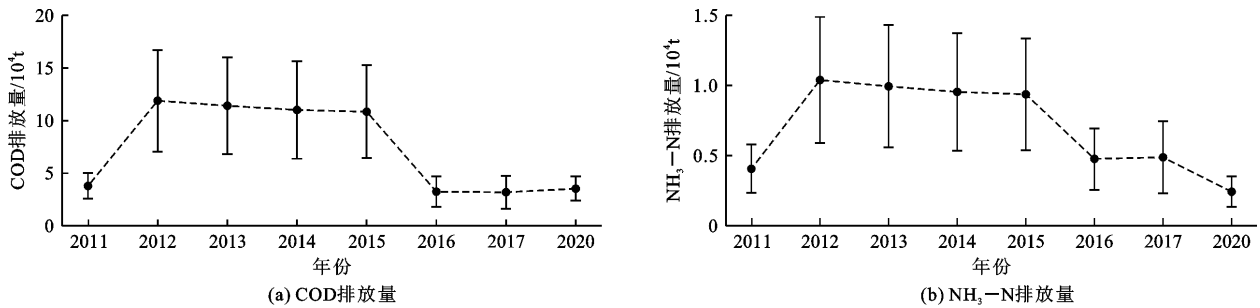


图 6 2011—2020 年山东省各部门用水结构的年际变化

(3)山东省高度重视生态文明建设,近年

来不断加大污染物排放总量的控制力度,严格落实生态环保督察问题整改工作,使全省 COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  排放量自 2012 年以来持续减少(图 7),其中 COD 排放量减少了 43.7% (枣庄市) ~ 79.2% (烟台市),  $\text{NH}_3\text{-N}$  排放量减少了 63.1% (日照市) ~

82.6% (威海市),取得了显著的环境效益。另外,污水处理能力的不断提升使全省再生水利用率逐渐提高。截至 2020 年底,全省城市污水处理厂已实现回用的污水量为  $23.69 \times 10^8 \text{ t}$ ,再生水利用率达到 45.8%<sup>[27]</sup>,有效提升了水资源的利用效能。



注: 2018—2019年统计年鉴中的数据均为2017年数据。

图7 2011—2020年山东省 COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  排放量年际变化

#### 4.2 用水效率区域差异分析

山东省用水效率相对全国平均水平而言总体较高,但也存在明显的区域不均衡等特点。无论整体还是农业、工业用水水平,胶东半岛均为最高,其次为鲁中,再次鲁南,鲁西北最低(图 1,表 1)。这种区域差异特征与当地经济发展水平和产业结构紧密相关。在全省,胶东半岛经济发展水平最高(图 5(a)),产业结构也较为合理,第一、二产业增加值所占 GDP 比重均较低,而第三产业占比较高(图 5(b)~5(d)),因此用水效率总体较高。鲁西北则相反,人均 GDP 较低(图 5(a)),第一、二产业增加值占比较大,而第三产业占比较小(图 5(b)~5(d)),导致经济发展水平落后,用水效率较低。而且,鲁西北能接受黄河水补给,农业比较发达,但盐碱地分布范围也较广<sup>[28]</sup>,导致灌溉及洗盐压碱的耗水量巨大。

在山东省 16 地市中,青岛市用水效率最高,主要因为青岛市经济发展水平最高,2020 年人均 GDP 高达  $12.8 \times 10^4$  元。而且,第三产业占比在全省(除济南市)最高(61.4%),第一产业占比则最低(3.4%),使得青岛市万元 GDP 用水量和万元农业增加值用水量在全省最低。相对而言,聊城市人均 GDP 在全省(除菏泽市)最低( $4.4 \times 10^4$  元),而且第一产业占比最高(14.4%),农业用水量较大(占用水总量的 78.8%),使得水资源利用的技术效率和规模效率均为全省最低(表 1),从而导致其水资源综合利用效率为全省最低。

#### 4.3 未来展望及建议

综上分析表明,山东省特别是鲁西北和鲁南地区水资源利用效率有待进一步提升。为此,提出以

下几点建议:(1)落实总量强度双控制度,全面实施最严格的水资源管理制度考核,通过考核机制倒逼供给侧“优化提升”和水资源节约集约利用。(2)提高科技投入,发展和完善技术,促进技术进步和创新,进一步挖掘节水潜力,尤其鲁西北和鲁南地区的用水效率提升空间较大。(3)以山东引黄灌区等为重点,开展灌区现代化改造,打造高效节水灌溉示范区,建设节水型农业。(4)着力发展电子信息、装备制造、汽车及零部件、食品等高成长性制造业,培育壮大生物医药、节能环保、新能源、新材料等战略性新兴产业,积极拓展现代服务业,减少工业用水量。(5)加大海水、再生水、微咸水等非常规水资源利用水平,如全力推进海水淡化及综合利用项目,不断提高海水替代淡水水资源的贡献率;进一步提高城市再生水利用率,在盐碱地区加快推广使用微咸水与淡水合理组合的灌溉模式等,以节约淡水资源。

## 5 结论

本文结合用水效率指标和 DEA - Malmquist 模型对 2011—2020 年山东省 16 个地市的水资源利用效率进行了定性和定量评估,得出的主要结论如下:

(1)山东省综合及工、农业用水效率均高于全国总体水平。全省水资源利用综合效率均值为 0.929,整体较高,但仍存在一定的提升空间。

(2)山东省用水效率存在明显的区域差异,胶东半岛用水效率在全省最高(尤其青岛市),其次为鲁中,再次为鲁南,鲁西北最低。济南、青岛、淄博、烟台、济宁、威海、日照和菏泽市的综合效率均为 1,达到 DEA 有效,且规模和技术均有效,水资源利用



效率较高。其他地市未达到 DEA 有效,尤其聊城市水资源综合利用效率在全省最低。

(3) 山东省全要素生产率(TFP)变化指数平均升高了 8.2%,用水效率整体呈上升趋势,主要受技术进步增长的影响。所有地市 TFP 变化指数均大于 1,其中青岛、烟台和威海市用水效率增长幅度较大,分别为 12.7%、24.1% 和 12.6%。但自 2014 年以来,全省 TFP 变化指数总体下降,未来山东省水资源利用效率还有待提升。

(4) 山东省可加大科技投入,促进技术创新,并适当控制鲁西北和鲁南地区的生产规模,加快产业结构和布局的优化调整,进一步挖掘节水潜力。同时,应加大非常规水资源(海水、再生水、微咸水等)的利用水平,以保障全省水资源的可持续利用和经济社会的高质量发展。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG Wenge, DU Xianzeng, HUANG Anqi, et al. Analysis and comprehensive evaluation of water use efficiency in China[J]. *Water*, 2019, 11(12): 2620.
- [2] 孙才志,马奇飞. 中国省际水资源绿色效率空间关联网络研究[J]. *地理研究*, 2020, 39(1): 53-63.
- [3] LIU Kaidi, YANG Guoliang, YANG Duogui. Industrial water-use efficiency in China: regional heterogeneity and incentives identification[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 258: 120828.
- [4] PAN Zhengwei, WANG Yanhua, ZHOU Yuliang, et al. Analysis of the water use efficiency using super-efficiency data envelopment analysis[J]. *Applied Water Science*, 2020, 10: 139.
- [5] AN Ziyao, YAN Jingjing, SHA Jinghua, et al. Dynamic simulation for comprehensive water resources policies to improve water-use efficiency in coastal city[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28: 25628-25649.
- [6] LIU Gang, NAJMUDDIN O, ZHANG Fan. Evolution and the drivers of water use efficiency in the water-deficient regions: a case study on  $\Omega$ -shaped Region along the Yellow River, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29: 19324-19336.
- [7] 胡妍,李巍. 区域用水环境经济综合效率及其影响因素——基于 DEA 和 Malmquist 指数模型[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(4): 1275-1280.
- [8] 海霞,李伟峰,王朝,等. 京津冀城市群用水效率及其与城市化水平的关系[J]. *生态学报*, 2018, 38(12): 4245-4256.
- [9] 胡德秀,刘子晨,刘铁龙,等. 陕西省渭河流域用水效率时空差异性分析[J]. *人民黄河*, 2020, 42(8): 56-61.
- [10] 查建平,蔡威熙. 黄河流域用水效率及空间溢出效应研究[J]. *节水灌溉*, 2022(1): 26-30+35.
- [11] 党丽娟. 黄河流域工业用水效率提升策略研究[J]. *人民黄河*, 2023, 45(1): 76-81.
- [12] 匡佳丽,唐德善. 长江中游地区用水效率评价及时空差异分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(3): 65-71+80.
- [13] 朱晓梅,魏加华,杨海娇,等. 黄河流域城市群水资源利用效率评估及驱动因子分析[J]. *水资源保护*, 2022, 38(1): 153-159.
- [14] 庞庆华,周末沫. 基于 DEA-Malmquist 模型的用水效率综合评价研究[J]. *人民长江*, 2020, 51(9): 90-95.
- [15] 何楠,袁胜楠,王军. 基于 DEA-Malmquist 模型的黄河流域水资源利用效率评价[J]. *人民黄河*, 2021, 43(5): 7-11.
- [16] 郑乐,杨法暄,钱会,等. 基于超效率 DEA 模型的宁夏工业水资源利用效率研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(2): 81-86.
- [17] 钱文婧,贺灿飞. 中国水资源利用效率区域差异及影响因素研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(2): 54-60.
- [18] 武翠芳,县雅宁. 基于 DEA 模型的黄河流域水资源利用效率的评价研究[J]. *河北地质大学学报*, 2021, 44(5): 119-124.
- [19] 栾健,周玉玺. 基于 DEA 和 Malmquist 指数的山东省用水效率分析[J]. *山东农业大学学报(社会科学版)*, 2015, 17(3): 76-81.
- [20] 钟磊,吴成国,金菊良,等. 数据包络分析法和 Malmquist 指数在山东省用水效率分析中的应用[J]. *水电能源科学*, 2016, 34(5): 20-24.
- [21] 段长桂,董增川,管西柯,等. 基于迭代思想的山东省水资源利用效率评价[J]. *人民黄河*, 2017, 39(2): 62-66.
- [22] 邓兆远. 山东省地级市用水效率分析[J]. *国土与自然资源研究*, 2019(3): 7-8.
- [23] 丁绪辉,高素惠,吴凤平. 环境规制、FDI 集聚与长江经济带用水效率的空间溢出效应研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(8): 148-155.
- [24] 佟金萍,马剑锋,刘高峰. 基于完全分解模型的中国万元 GDP 用水量变动及因素分析[J]. *资源科学*, 2011, 33(10): 1870-1876.
- [25] 朱启林. 北京市用水水平评价与分析[J]. *人民长江*, 2016, 47(S1): 80-84.
- [26] 张立志,齐子瑞,王昕. 山东省农业节水现状及发展建议[J]. *山东水利*, 2022(10): 1-4.
- [27] 李艺,李爱华. 山东推动再生水循环利用实现多赢[N]. *中国环境报*, 2022-12-08(第3版).
- [28] 董红云,朱振林,李新华,等. 山东省盐碱地分布、改良利用现状与治理成效潜力分析[J]. *山东农业科学*, 2017, 49(5): 134-139.