

广东省工业用水效率评价及其影响因素研究*

周桂欢 鱼京善[†] 王纤阳

(北京师范大学水科学研究院,城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室,100875,北京)

摘要 水资源短缺是制约广东省社会经济可持续发展的重要因素,研究工业用水效率及其影响因素对缓解水资源压力和实现水资源可持续利用具有重要意义.本研究基于2011—2020年广东省21个地级市的面板数据,采用基于数据包络法的BBC模型和Malmquist指数,对广东省21个地级市的工业用水效率进行测算,并利用Tobit回归模型分析了工业用水效率的影响因素.结果表明:1)2011—2020年,广东省工业用水效率总体有所提升,2011—2015年呈上升趋势,2016—2020年呈波动缓慢下降趋势;2)经济发达的地级市工业用水效率相对较高,经济落后的地级市则相对较低,工业用水效率增长速度由高到低排序依次为粤东、粤北、粤西、珠三角地区,区域内各地级市的工业用水效率变化情况存在差异性;3)技术进步是这一时期工业用水效率提升的主要因素,规模效率较大程度地影响着工业用水效率的上升和下降;4)经济发展水平和产业结构与工业用水效率呈显著的正相关关系,合理的水资源管理政策对工业用水效率的提升有促进作用,技术创新因素与工业用水效率呈负相关关系.建议坚持节水优先,在现有基础上完善水资源管理制度,加大科技投入,加快工业产业转型升级和集群化,促进工业用水效率提升.

关键词 工业用水效率;DEA模型;Tobit模型;影响因素;广东省

中图分类号 TV213.9

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2022316

0 引言

水资源对社会经济的发展至关重要,是工业经济发展的血脉.广东省是我国的工业大省,2020年广东省工业生产总产值占全国工业生产总产值的12.4%,在我国改革开放和社会主义现代化建设大局中占有十分重要的地位.改革开放40多年来,广东省社会经济快速发展,用水需求不断增加,大量工业废水排入河道导致水环境严重污染,在最严格水资源管理制度和《水污染防治法》等一系列政策法规的实施下,万元GDP用水量逐渐下降,水资源利用水平得到提高,水环境得到一定程度的改善.然而,广东省水资源时空分布不均且人口基数大,人均水资源量低于全国平均水平,水资源供需压力仍然严峻,水资源短缺仍是广东省社会经济可持续发展,尤其是工业发展的重要制约因素.在有限的水资源总量条件下,解决水资源短缺问题的关键途径在于提高用水效率,实现水资源的高效利用,因此,测算工业用水效率及其影响因素,对缓解广东省水资源压力和实现社会经济可持续发展具有重要意义,可以为广东省工业产业绿色转型升级及制定相应的水资源政策提供科学参考.

用水效率是水资源管理的热点研究内容,其中,工业用水效率是反映工业生产过程中水资源利用有效性的指标.国内学者对用水效率做了不少研究,多集中于省级层面或地级市层面,主要研究方法有数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)方法,如CCR、BBC、SBM等模型,以及随机前沿分析(SFA)方法、DDF模型^[1-2]等.张黎鸣等^[3]、史毅超等^[4]、庞庆华等^[5]等利用DEA模型和Malmquist指数对省级、地市或流域尺度的水资源利用效率进行了研究;左其亭等^[6]基于Super-SBM模型对黄河流域9省区、7个城市群、62个主要城市多个尺度的水资源利用效率进行了研究.在对水资源利用效率测算和分析的基础上,众多学者还对用水效率的影响因素进行了研究.丁绪辉等^[7]、秦腾等^[8]基于回归模型等方法探究了省级水资源利用效率的影响因素,为水资源管理政策的制定提出了针对性的建议;胡彪等^[9]运用SBM模型研究了京津冀地区城市工业用水效率,并利用回归模型对工业用水效率的相关影响因素进行了分析;何佳音等^[10]利用CCR模型测算了湖南省工业用水效率并分析了其影响因素.不少学者对广东省水资源利用效率进行了研究,如黎锐锋^[11]基于2004—2013

* 国家自然科学基金重点资助项目(52239003);济南市水务科技资助项目(JNSWKJ202001)

[†] 通信作者:鱼京善(1965—),男,教授,博士.研究方向:水文水资源. E-mail: jingshan@bnu.edu.cn

收稿日期:2022-10-20

年的面板数据,计算了广东省 21 个地级市的工业用水效率和工业节水潜力,结果表明珠三角城市的工业用水效率远高于其他地区的城市,工业节水难度大,而其他地区城市的工业用水效率较低,未来节水潜力较大;龚镇杰^[12]、晏琪^[13]等利用超效率 SBM 模型研究了广东省水资源利用效率的时空变化特征和影响因素,发现人均用水量、第二产业用水占比、万元 GDP 用水量、工业产值占比对用水效率的提升为抑制作用,R&D 支出占比对用水效率的提升在粤北地区呈现为促进作用,在粤东地区呈现为抑制作用;龚镇杰等^[14]以万元 GDP 用水量、农田灌溉亩均用水量为用水效率指标,通过空间自相关分析发现全省总体呈现珠三角为用水效率高值区,东西两翼与粤北为用水效率低值区的空间分布格局;刘莉等^[15]基于人工鱼群算法投影寻踪模型,得到的 2018 年广东省用水效率具有相似的空间格局,并通过地理探测器分析了水资源条件和城市发展水平对用水效率的影响;洪思扬等^[16]则探究了广东省的水与能源利用效率,发现农林牧渔产品和服务、食品和烟草、通信设备、建筑、电气机械和器材、纺织服装、造纸印刷、化学产品以及木材加工和家具等部门是最终使用水资源量最多的部门。

综上所述,有关广东省用水效率多集中于整体的水资源利用效率,工业用水效率相关研究较为缺乏,且未能深入探究其分解效率和影响因素,较少关注工业转型升级与水资源利用的协调发展问题,因此,在广东省产业转移和工业转型升级的背景下,特别是在 2012 年实施最严格水资源管理制度以来,工业用水效率的变化情况、驱动要素及影响因素,都需要进一步展开研究。鉴于此,本研究基于 DEA 模型和 DEA-Malmquist 指数,对广东省 21 个地级市的工业用水效率进行测算,从技术和规模角度深入分析效率的时空变化情况和驱动因素,并利用 Tobit 模型分析工业用水效率的影响因素,特别选取了产业转型升级相关指标探究了工业转型升级对工业用水效率的影响,以期广东省建设节水型社会和制定水资源管理政策提供科学参考。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况 广东省位于我国东南沿海地区,属于亚热带季风气候,降水丰沛,水资源总量丰富。广东省水资源公报显示,全省多年平均降水量 1 770.6 mm,降水主要集中在汛期(4—9 月),降水多以洪水的形式流向大海,大大减少了可支配的水资源量。广东省水资源总量丰沛,但人均水资源量低,多

年人均水资源量为 1 458 m³,远低于全国多年人均水资源量(2 052 m³)。除此之外,广东省东江流域保障着香港的供水安全,进一步增大了广东省的水资源压力。2020 年,广东省用水总量 405.1 亿 m³,工业用水量 80.4 亿 m³,均为全国第三;万元工业增加值用水量为 20.7 m³,与北京市(7.1 m³)、天津市(10.7 m³)等地区仍具有较大差距,广东省工业领域具有很大节水潜力。

广东省是全国经济第一大省,同时也是人口大省和工业强省。2020 年,广东省常住人口 12 601.25 万人(广东省第七次全国人口普查公报),约占全国总人口的 8.9%。全省地区生产总值 110 760.94 亿元,约占全国国内生产总值的 10.9%,居全国首位。该省以第二、三产业为主导,2020 年三次产业结构比例为 4.3 : 39.2 : 56.2。其中,第二产业增加值 43 450.17 亿元,居全国第 2 位,仅次于江苏省(44 226.4 亿元)。但是,广东省内各地级市之间发展极不均衡,2020 年地区生产总值最高的地级市深圳市达 27 670.24 亿元,最低的地级市云浮市仅为 1 002.18 亿元。

广东省的制造业发达,行业门类齐全,全省制造业增加值约占规模以上工业企业增加值的 9 成以上。电子信息、汽车、纺织服装、绿色石化、智能家电、软件与信息服务、生物医药与健康、超高清视频显示、现代农业与食品等产业已成为广东省经济稳定发展的支柱产业。各产业集群主要集中在珠三角各大城市;部分在粤东、粤西地区,主要是汕头市和湛江市;粤北地区则较为薄弱,以农业与食品业为主,只有少量的汽车、先进材料、纺织等产业的配套产业,且工业园区配套基础设施较为落后。此外,石化产业则主要分布在广州、惠州、湛江、茂名、揭阳、珠海等地的化工基地,逐步形成粤东、粤西两翼提供原材料,珠三角进行精深加工的沿海石化产业经济带。在规模以上工业企业增加值中,轻、重工业增加值比值约为 1 : 2。近年来,广东省积极推动产业从珠三角向其他区域转移,协同推进工业转型升级,2020 年,全省先进制造业增加值 18 075.6 亿元,占全省规模以上工业增加值的 55.6%;高技术制造业增加值 10 350.06 亿元,占全省规模以上工业增加值的 31.8%;先进制造业和高技术制造业的增加值和占比逐年稳步提高。

1.2 DEA 模型

1.2.1 模型选取 DEA 是以相对效率概念为基础,对相同类型的决策单元(DMU)进行相对有效性评价的一种线性规划方法^[17]。在 DEA 模型中,利用所有 DMU 的投入或产出确定相对有效的生产前沿面,通过每个 DMU 与生产前沿面的投影距离判断其是否有

效^[4]。当 DMU 位于生产前沿时, DMU 达到相对有效, 效率值为 1, 用水效率最大化。

目前, 常用的 DEA 模型有 CCR 模型和 BBC 模型^[18]。CCR 模型是基于规模收益不变的假设, 即投入的变化将产生相同比例的产出变化, 测算水资源的综合效率, 也称技术效率(TE); BBC 模型则考虑了可变规模收益, 将综合效率(TE)分解为纯技术效率(PTE)和规模效率(SE), 也就是说, DMU 效率是由投入产出因素和规模因素 2 方面决定^[3]。此外, DEA 模型可分为投入导向型和产出导向型。其中: 投入导向型旨在保持相同产出情况下, 使投入最小化^[19]; 而产出导向型旨在用相同水平的投入实现产出最大化。由于目前经济发展与水资源短缺矛盾日益突出, 基于减少水资源投入(即增加节水量)的需求, 投入导向型 DEA 模型更适用于工业用水效率的评价。因此, 本研究采用投入导向型的 BBC 模型对广东省工业用水效率进行分析。

具体模型描述如下: 假设有 m 个决策单元, 各决策单元均有 g 项投入指标和 h 项产出指标, 用 $x_{ik}(x_{ik} > 0; i = 1, 2, \dots, g)$ 表示第 k 个决策单元的第 i 项投入指标, 用 $y_{jk}(y_{jk} > 0; j = 1, 2, \dots, h)$ 表示第 k 个决策单元的第 j 项产出指标, 记 $X_k = (x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{gk})^T, Y_k = (y_{1k}, y_{2k}, \dots, y_{hk})^T$ 。应满足

$$\begin{cases} \min \theta, \\ \sum_{k=1}^m \lambda_k X_k + S^- = \theta X_0, \\ \sum_{k=1}^m \lambda_k Y_k - S^+ = Y_0, \\ \sum_{k=1}^m \lambda_k = Y, \\ \lambda_k \geq 0, k = 1, 2, \dots, m, \\ S^+ \geq 0, S^- \geq 0, \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ 为工业用水效率的评价值; λ_k 为各决策单元投入和产出指标的权向量; S^- 为投入松弛变量, S^+ 为产出松弛变量。DEAP 2.1 软件是一款数据包络分析软件, 常用来计算生产过程中的效率问题, 可用来计算 CCR 模型、BBC 模型和 Malmquist 指数等。

1.2.2 DEA-Malmquist 指数 为研究广东省工业用水效率的动态变化, 本研究采用 Färe 等^[20]提出的 DEA-Malmquist 指数分析工业用水效率的变动情况。根据 Färe 等的定义, 距离函数是效率的倒数, 通过距离函数之比可得到全要素生产率值(Malmquist 指数)。

用 T_{fp} 表示 Malmquist 指数, C_E 表示技术效率变化, C_T 表示技术进步变化, C_P 表示纯技术效率变化, C_S 表示规模效率变化, 则在不同的规模报酬条件下,

T_{fp} 可分解为 C_E 和 C_T , C_E 又可分解为 C_P 和 C_S , 具体定义为^[21-22]

$$T_{fp} = C_E \times C_T = (C_P \times C_S) \times C_T, \quad (2)$$

$$C_E = \frac{D_{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1} | S_{CR})}{D_t(x_t, y_t | S_{CR})}, \quad (3)$$

$$C_P = \frac{D_{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1} | S_{VR})}{D_t(x_t, y_t | S_{VR})}, \quad (4)$$

$$C_S = \frac{D_{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1} | S_{CR})}{D_{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1} | S_{VR})} \cdot \frac{D_t(x_t, y_t | S_{VR})}{D_t(x_t, y_t | S_{CR})}, \quad (5)$$

$$C_T = \left[\frac{D_t(x_{t+1}, y_{t+1})}{D_{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})} \cdot \frac{D_t(x_t, y_t)}{D_{t+1}(x_t, y_t)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

式中: D 为距离函数; D_t 表示参考时间为 t 时的距离函数; x_t, y_t 分别表示参考时间为 t 时的投入和产出向量; $D_t(x_{t+1}, y_{t+1})$ 为参考时间为 t 时, $t+1$ 时期的决策单元的距离函数; S_{VR} 表示规模报酬变化, S_{CR} 表示规模报酬不变。

当 $T_{fp} > 1$ 时, 表示从 t 时期到 $t+1$ 时期决策单元的效率处于上升阶段; 当 $T_{fp} = 1$ 时, 则表示保持不变; 当 $T_{fp} < 1$ 时, 则表示处于下降阶段^[23]。若 $C_E > 1$, 表明决策单元改进了现有技术, 相对效率有所提高; 若 $C_T > 1$, 表明现有技术发生了进步和创新; C_P 反映决策单元的管理水平变化, 若 $C_P > 1$ 则表示管理有所改善, 促进效率的提升, 若 $C_P < 1$ 则意味着管理不善使得效率下降; 若 $C_S > 1$, 表示规模扩大, 促进了效率提高, 若 $C_S < 1$ 则表示决策单元投入规模不足导致效率下降^[22]。

1.2.3 指标选取和数据来源 关于指标的选择, 在投入指标方面, 多数学者将资本、劳动力和生产要素等作为模型投入, 如 Chen 等^[24]、党丽娟^[25]、姬志恒等^[26]将工业固定资产投资或工业资产总计、工业从业人数和工业用水量作为工业用水效率评价的投入指标; 胡彪等^[9]将城市固定资产投资总额、二三产业从业人数和工业用水消耗总量作为投入变量。在产出指标方面, 多数学者将工业增加值作为地区工业用水效率评价的产出指标, 个别学者选择工业生产总产值作为产出指标^[9]; 考虑到工业生产导致的环境污染排放, 部分学者将工业废水排放量作为工业用水的非期望产出指标之一^[9, 26]。在以往研究的基础上, 基于数据的可获得性, 本研究选取工业用水量、工业固定资产投资总额、工业从业人员人数作为投入指标, 以及选取工业增加值作为产出指标, 如表 1 所示。本研究的指标数据包括 2011—2020 年广东省 21 个地级市的相关数据, 主要来源于 2010—2021 年《广东省水资源公

表 1 广东省工业用水效率评价指标体系

一级指标	二级指标	具体指标	平均值	标准差	最大值	最小值
投入指标	资源投入	工业用水量/亿m ³	5.21	7.82	44.35	0.60
	资本投入	工业固定资产投资总额/亿元	446.91	297.18	1 690.71	64.87
	劳动投入	工业从业人员数/万人	121.31	131.21	514.74	18.13
产出指标	经济效益	工业增加值/亿元	1 566.79	1 950.85	9 587.94	181.35

报》《广东省统计年鉴》以及各市的统计公报和统计年鉴。

1.3 Tobit 回归模型 由于 DEA 模型得到的工业用水效率值分布在 0~1 之间, 属于受限因变量, 若用普通最小二乘法进行回归分析会导致参数估计有偏差^[27]。因此, 为进一步探究广东省工业用水效率的影响因素, 本研究选择基于最大似然估计法的 Tobit 回归模型对影响因素进行分析, 具体设定为

$$Y_{TE} = \beta_0 + \sum_j \beta_j X_{j, it} + \varepsilon_{it}, \quad (7)$$

式中: Y_{TE} 为工业用水效率的综合效率, 即被解释变量; $X_{j, it}$ 为第 j 个影响因素, 即解释变量, i 与 t 分别表示不同地级市和年份; β_0 和 β_j 为相关变量的待估计参数; ε_{it} 为随机误差项。

2 结果与讨论

2.1 工业用水效率测算 利用 DEAP 2.1 软件对 2011—2020 年广东省 21 个地级市工业用水效率进行测算。从总体来看, 2011—2020 年广东省工业用水综合效率、纯技术效率和规模效率的平均值分别为 0.724、0.901 和 0.808, 整体工业用水效率未达到有效水平。从时间变化来看(图 1), 全省综合效率总体呈先上升后下降的趋势, 2011—2015 年效率值呈上升趋势, 2015 年达到最高, 2016 年之后波动下降; 纯技术效率则先上升后略微下降且趋于稳定; 规模效率的变化趋势与综合效率基本一致。这说明, 在提出实施最严格水资源管理制度后, 广东省的水资源管理取得了

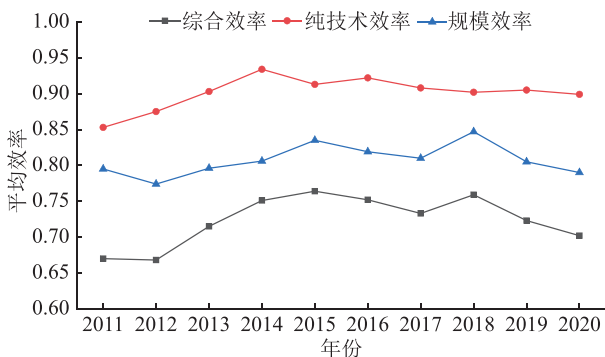


图 1 2011—2020 年广东省平均工业用水效率变化趋势

初步成效, 但是 2016 年之后到达瓶颈期, 工业用水效率上升困难且略有下降。

从空间变化来看(图 2), 工业用水综合效率接近或等于 1 的地级市有深圳市、佛山市和广州市, 数量占比为 14.3%。这 3 个地级市的地区生产总值和工业增加值均为全省前三, 具有较高的经济水平, 在规模效应的影响下, 相同的生产要素产生更多的效益; 且通过产业转移、技术改进等优化了产业结构, 拥有合理的水资源管理政策和先进的节水技术, 故具有较高的工业用水效率。其余 18 个地级市中, 除了珠海市、肇庆市和揭阳市部分年份处于生产前沿面, 其余的工业用水综合效率均 < 1 , 普遍存在水资源浪费和投入冗余等问题。工业用水效率排名靠后的 7 个地级市为云浮市、清远市、汕尾市、东莞市、潮州市、汕头市和梅州市, 综合效率平均值均 < 0.6 , 其中梅州市仅为 0.40。在这些地级市中, 普遍存在高耗水行业较多、工业技术落后、生产效率低、节水意识不强等问题, 这些问题直接或间接地导致了工业生产过程中的水资源浪费, 降低了工业用水效率。其中, 粤东地区的汕尾市、潮州市和汕头市, 其支撑产业中有大量的高耗水产业, 如食品加工、纺织服装、工艺品加工等; 珠三角地区的东莞市的 5 大支柱产业为电子信息制造业、电气机械及设备制造业、纺织服装鞋帽业、造纸业和食品饮料加工业, 这些产业需要大量的生产用水或清洁用水, 同时工业技术的更新和水资源的管理滞后于产业规模的扩大, 导致了东莞市工业用水效率较低; 而粤北地区的云浮市、清远市和梅州市的经济落后, 支柱产业多为过时的重工业、资源产业、落后的轻工业或者与农业相关的食品加工, 如云浮市的石材加工、金属制造, 清远市的水泥、陶瓷、有色金属, 梅州市的电力、建材、电子信息、机电制造等产业, 经济效益低, 耗水量大, 水污染严重。因此, 这些地级市的工业用水效率较低。

将综合效率进行分解发现(图 3), 各地级市受到技术和规模 2 方面的影响程度有所不同。珠三角地区的广州市、深圳市、佛山市、珠海市、中山市, 粤东地区的汕头市, 以及粤西地区的湛江市、茂名市等 8 个

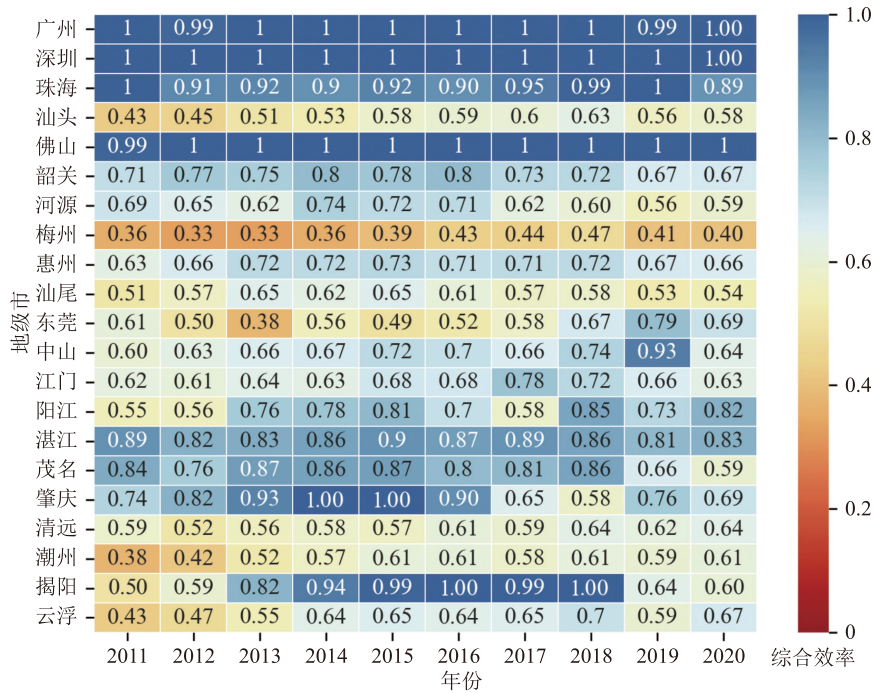


图 2 2011—2020 年广东省 21 个地级市工业用水综合效率

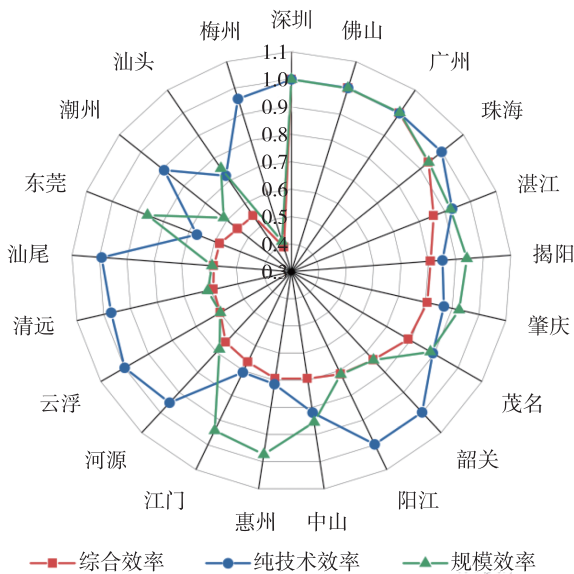


图 3 2011—2020 年广东省各地级市工业用水效率平均值

地级市的纯技术效率和规模效率接近,在技术创新和经济规模 2 个方面均表现良好。珠三角地区的肇庆市、惠州市、江门市、东莞市和粤东地区的揭阳市等 5 个地级市的规模效率较高,纯技术效率较低,表明工业产业规模稳步增长,但是工业生产技术和节水管理滞后于工业规模的扩大,从而降低了工业用水效率。因此,这 5 个地级市仍需加大技术的改革和创新,提升工业水资源管理水平。粤东地区的汕尾市、潮州市,粤西地区的阳江市及粤北地区的韶关市、河源市、云浮市、清远市、梅州市等 8 个地级市的规模效率较低,纯技术效率较高,而这 8 个地级市 2020 年的

地区生产总值和工业增加值在全省排名均为最后 8 名,根据发展经济学理论,生产规模不足,规模效应在这些地区较难体现,生产要素得不到合理的配置,制约了工业用水效率的提升。

2.2 工业用水效率的 T_{ip} 指数分析 T_{ip} 又称全要素生产率,为进一步分析用水效率的变化趋势和内在驱动因素,利用 DEAP 2.1 软件得到 2011—2020 年广东省 21 个地级市工业用水效率的 T_{ip} 及分解结果(图 4 和表 2)。从总体来看,2011—2020 年:广东省工业用水效率的 T_{ip} 平均值为 1.050,表明广东省工业用水效率在这一时期整体呈上升趋势; C_E 和 C_T 的平均值分别为 1.008 和 1.042,表明技术效率和技术进步整体呈上升趋势,且技术进步是广东省工业用水效率提升的主要驱动因素。进一步分解 C_E 发现, C_p 和 C_s 的平均值分别为 1.007 和 1.001,表明广东省工业领域的技术和水资源开发利用管理水平有所改善,促进了工业用水效率的提升,而规模效应对工业用水效率的平均作用不大。

从时间上看(图 4):2011—2018 年 $T_{ip} > 1$,工业用水效率呈现上升态势;2018—2020 年 $T_{ip} < 1$,工业用水效率呈现下降态势。 C_E 上下波动,与 T_{ip} 的变化趋势基本一致,表明各生产要素的配置不断变化, C_E 是制约广东省工业用水效率的主要因素。将 C_E 分解为 C_p 和 C_s ,发现 C_E 受规模效率影响大于纯技术效率影响。2011—2016 年 C_p 基本 > 1 ,2016 年以后趋于稳定,说明在 2011—2016 年“最严格水资源管理制度”的实施使得广东省工业管理水平有所提升,2016 年以后

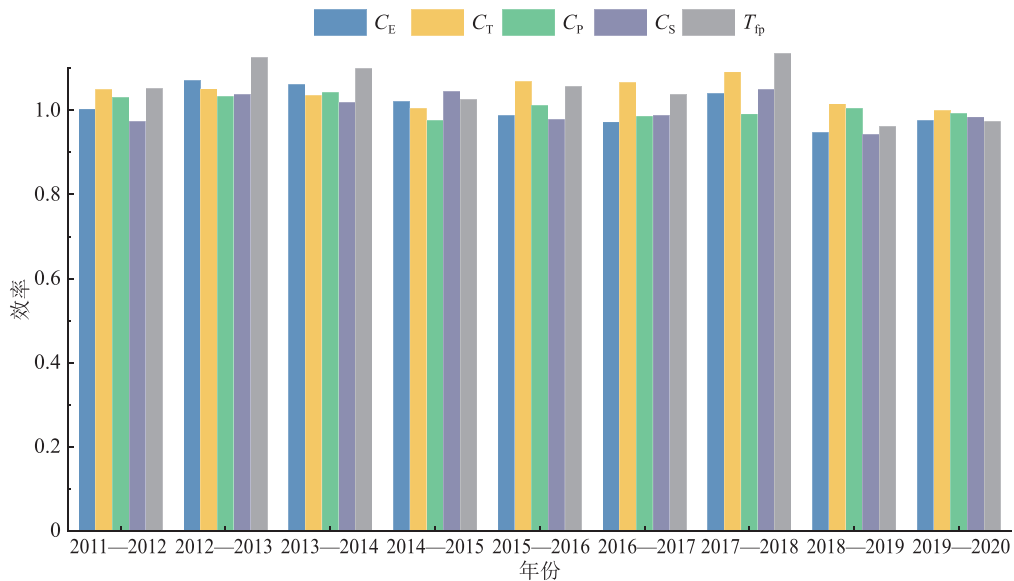
图 4 2011—2020 年广东省工业用水效率 T_{fp} 及分解结果

表 2 广东省各地级市工业用水效率 Malmquist 指数及分解结果

地级市	C_E	C_T	C_P	C_S	T_{fp}	地级市	C_E	C_T	C_P	C_S	T_{fp}
广州	1.000	1.039	1.000	1.000	1.039	阳江	1.045	1.048	1.000	1.045	1.095
深圳	1.000	1.032	1.000	1.000	1.032	湛江	0.991	1.047	0.998	0.993	1.038
珠海	0.987	1.043	0.998	0.989	1.029	茂名	0.963	1.050	0.978	0.985	1.011
汕头	1.035	1.047	1.033	1.003	1.084	肇庆	0.993	1.049	0.993	1.000	1.041
佛山	1.001	1.050	1.000	1.001	1.051	清远	1.009	1.045	1.028	0.981	1.054
韶关	0.994	1.049	1.000	0.994	1.043	潮州	1.055	1.044	1.047	1.008	1.102
河源	0.984	1.048	0.991	0.993	1.031	揭阳	1.021	1.048	1.014	1.006	1.069
梅州	1.012	1.048	1.000	1.012	1.060	云浮	1.051	1.049	1.000	1.051	1.103
惠州	1.004	1.047	1.008	0.996	1.051	珠三角	1.001	1.035	1.007	0.994	1.036
汕尾	1.006	1.043	0.999	1.007	1.049	粤东	1.029	1.046	1.023	1.006	1.076
东莞	1.014	0.981	1.014	1.000	0.995	粤西	1.000	1.048	0.992	1.008	1.048
中山	1.007	1.023	1.041	0.968	1.031	粤北	1.010	1.048	1.004	1.006	1.058
江门	1.003	1.048	1.010	0.993	1.051	全省	1.008	1.042	1.007	1.001	1.050

注: C_E 为技术效率变化, C_T 为技术进步变化, C_P 为纯技术效率变化, C_S 为规模效率变化, T_{fp} 为 Malmquist 指数。珠三角地区包括广州、深圳、珠海、佛山、江门、东莞、中山、惠州和肇庆; 粤东地区包括汕头、汕尾、潮州和揭阳; 粤西地区包括湛江、茂名和阳江; 粤北地区包括韶关、河源、梅州、清远和云浮。

管理上陷入瓶颈期, 没有得到显著改进。2012—2015、2017—2018 年 $C_S > 1$, 其余年份 $C_S < 1$, 是 C_E 和 T_{fp} 随时间变化的主要因素。2015 年以前我国经济高速发展, 具有较强的规模经济性, 工业用水效率受规模效率的影响稳步提高; 但是, 经济高速发展伴随的是高消耗、高污染、高排放, 规模效应的效果逐渐减小。为推动经济从高速增长转向高质量发展, 我国于 2015 年 11 月提出供给侧结构性改革, 旨在调整经济结构, 使要素实现最优配置。故 2015 年以后, 各产业开展供给侧结构性改革, 优化产业结构, 在向要素最优配置发展的过程中, 各生产要素不断调整, 所以

C_E 和 C_S 随之上下波动。此外, 2011—2019 年间 C_T 均 > 1 , 仅 2019—2020 年略 < 1 , 是使 $T_{fp} > 1$ 的主要因子, 因此, 技术进步是这一时期促进工业因素效率提升的主要动力。

从空间上看(表 2), 除东莞市的 $T_{fp} < 1$ 外, 其余地级市均 > 1 , 工业用水效率整体呈良好增长趋势。其中, 云浮市的工业用水效率上升趋势最为明显, T_{fp} 、 C_E 和 C_T 分别为 1.103、1.051 和 1.049, 工业用水效率上升了 10.3%, 说明同步提升技术效率和技术进步有助于大幅度提升工业用水效率; 珠海市、肇庆市、韶关市、河源市、湛江市、茂名市等 6 个地级市的

$C_E < 1$, 但 T_p 仍 > 1 , 表明技术进步对工业用水效率的提升发挥了主要作用, 同时低技术效率制约了工业用水效率的提升, 因此优化管理模式和生产要素投入是后续提高广东省工业用水效率的关键。

从珠三角、粤东、粤西和粤北4个地区来看, 各区域工业用水效率情况如下。

1) 2011—2020年, 珠三角地区工业用水效率稳步提升, 其中: 广州市、深圳市和佛山市的 C_E 、 C_P 、 C_S 均为1, 这是因为这3个地级市的工业用水效率基本等于最大值1, 但是 $C_T > 1$, 说明这10年间工业技术创新表现良好, 产业结构和生产要素配置呈良好发展态势; 珠海市和肇庆市的 $C_P < 1$, 需要加强水资源管理; 珠海市、惠州市、中山市、江门市等 $C_S < 1$, 存在投入规模不足的问题, 应调整产业结构, 优化生产要素配置, 推动产业集群化; 东莞市的 $C_T < 1$, 说明东莞市的水资源管理亟须调整, 并以技术创新促进工业用水效率提升。

2) 粤东地区的平均 T_p 最高, 各分解指数均 > 1 , 工业用水效率增长最快, 技术、管理、规模等方面均呈现良好发展状态; 但从产业结构看, 该地区4个地级市偏纺织服装等传统制造业且以中小企业为主, 经济增长受压, 需继续调整经济结构, 推进多市合作, 扩大产业规模, 推进技术改革和产业转型升级, 向绿色、低耗、清洁、高效的先进制造业转变。

3) 粤西地区的阳江市各指数均 ≥ 1 , 工业用水效率增长良好, 这得益于技术创新、产业的转型升级和规模化。近年来, 阳江市的特色传统产业(合金材料、食品加工等)和新兴产业(海上风电等)不断发展, 逐渐形成了规模化产业集群, 产业集群效应逐渐显现; 在技术创新方面, 成立了一系列的实验室和合作平台, 合金材料和海上风电等产业的技术不断取得突破, 促进了产业转型升级, 经济效益也不断提高。但粤西的湛江市和茂名市的 C_T 、 C_P 和 C_S 均 < 1 。湛江市以钢铁、石化产业为主, 茂名市是传统石化产业大市, 而钢铁、石化产业是传统的高耗水产业, 存在节水技术不足、用水管理不善及生产要素配置不优、投入规模不足等问题。目前, 湛江市和茂名市正在积极推动制造业转型升级和创新发展, 努力打造千亿级产业集群, 未来其工业用水效率有很大的上升空间。

4) 粤北地区各指数均值均 > 1 , 工业用水效率提升较快, 近年来珠三角地区部分产业转移到粤北地区, 粤北地区总体呈现出产业逐渐转型和产业结构优化, 技术逐渐改进, 水资源管理和生产要素配置水平逐渐改进的态势。其中, 韶关市是老工业城市, 2011年被列入全国第3批资源枯竭型城市, 2011—2020年工业

增加值占全市生产总值比例逐年下降; 10年间不断探索产业转型, 在转型过程中, $C_S < 1$, 工业用水的规模效率有所下降; 但是近年来韶关市的产业转型逐渐发挥成效, 2021年工业增加值占全市生产总值比例实现逆增, 电子信息、新材料、新能源等新兴产业逐渐发展, 未来的规模效率可能会有所改善, 工业用水效率进一步提升。河源市 C_P 和 C_S 均 < 1 , 说明水资源管理和产业结构优化等方面还需加强, 尤其是在电子信息、食品饮料等高耗水的主导产业。清远市的 $C_S < 1$ 、 $C_P > 1$, 得到 C_E 为1.009, 表明清远市近年来的产业技术有所改进, 节水水平有所提升, 但产业规模仍需调整和扩大, 争取将水泥、陶瓷、有色金属、农产品加工等传统产业和先进材料等产业进行规模化、集群化。云浮市和梅州市的 T_p 及分解的指数均 ≥ 1 , 工业用水效率呈现增长的良好态势。近年来, 云浮市支持石材加工技术改造, 推动石材企业集聚发展, 重视石材废渣处理和清洁生产; 梅州市聚焦电力、建材、电子信息、机电制造等传统产业, 通过技术创新和产业升级, 不断提高竞争优势、规模效益和扩散效应, 从而提高了工业用水效率。

2.3 工业用水效率的影响因素分析

2.3.1 指标选取与模型构建 众多学者对工业用水效率影响因素的选取进行了研究, 如: Chen等^[24]将人均水资源量、人均GDP、工业增加值占地区生产总值的百分比、外商直接投资占地区生产总值比例、R&D经费与工业增加值的百分比、污染治理投资占工业增加值的比例等作为工业用水效率的解释变量; 胡彪等^[9]采用城市年生产总值占全国国内生产总值比例、城市工业增加值占地区生产总值比例、人均GDP、人口密度等指标作为影响工业用水效率的因素; 田贵良等^[28]将人均水资源量、工业水务科研支出、工业废水排放量、工业用水占比、城镇化率作为水资源利用效率的影响因素。参考已有研究, 结合数据的可得性, 本研究从水资源禀赋、经济发展水平、产业结构等9个方面, 相应初步选取人均水资源量、人均GDP、工业增加值占地区生产总值的比例等作为工业用水效率的影响因素, 具体如表3所示。颇具新意的是, 将先进制造业增加值占规模以上工业比例和高技术制造业增加值占规模以上工业比例作为产业转型的重要指标, 探究工业转型升级对工业用水效率的影响。数据均来源于《广东省水资源公报》《广东省统计年鉴》以及各市的统计公报和统计年鉴。

首先采用多元线性逐步回归法对初步选取的指标进行分析, 对各指标进行初步筛选, 以工业用水综合效率为因变量, 以表3中各指标为自变量, 借助

SPSS 软件构建逐步回归模型, 对方程进行共线性检验、 F 显著性检验及参数显著性检验, 结果如表 4 所示. 初步筛选得到人均水资源量、人均 GDP、工业

增加值占地区生产总值比例等 9 个指标, 各指标之间的方差膨胀因子(VIF)均 <10 , 说明不存在明显共线性问题, 可以进行后续的 Tobit 回归分析.

表 3 初步选取的影响因素指标

影响因素	解释变量	均值	标准偏差	最大值	最小值
水资源禀赋	人均水资源量/ m^3	2 357.16	2 111.65	8 874.80	123.35
经济发展水平	人均GDP/万元	5.61	3.48	15.99	1.62
产业结构	工业增加值占地区生产总值比例/%	40.79	9.24	60.10	21.80
产业转型	先进制造业增加值占规模以上工业比例/%	38.35	17.42	75.30	8.10
	高技术制造业增加值占规模以上工业比例/%	15.80	15.53	67.40	0.30
技术创新	规模以上工业企业R&D经费支出/亿元	78.92	172.21	1 157.31	0.81
	规模以上工业企业R&D经费支出占工业增加值比例/%	2.87	2.22	12.15	0.28
水资源管理政策	万元工业增加值用水量/ m^3	43.15	36.82	196.00	4.70
外商投资	外商直接投资/亿元	73.58	122.63	595.42	1.08
水污染排放	万元工业增加值废水排放量/ m^3	5.16	6.74	31.67	0.63
	工业废水排放量/亿t	0.70	0.61	2.91	0.04
社会因素	人口密度/(人· km^2)	1 307.03	1 659.85	8 830.15	153.92
	城镇化率/%	63.69	19.65	100.00	35.90

表 4 影响因素指标的多元线性逐步回归结果

变量名称	变量	未标准化系数	标准误	标准化系数	t	显著性	VIF
常量	C	0.164	0.059	—	2.769	0.006	—
人均水资源量	X_1	<0.001	<0.001	0.281	4.647	<0.001	2.055
人均GDP	X_2	0.034	0.006	0.656	5.826	<0.001	7.118
工业增加值占地区生产总值比例	X_3	0.007	0.001	0.351	6.342	<0.001	1.722
先进制造业增加值占规模以上工业比例	X_4	0.005	0.001	0.469	7.483	<0.001	2.206
高技术制造业增加值占规模以上工业比例	X_5	-0.006	0.001	-0.550	-7.459	<0.001	3.047
规模以上工业企业R&D经费支出占工业增加值比例	X_6	-0.017	0.009	-0.204	-1.870	0.063	6.707
万元工业增加值用水量	X_7	-0.001	<0.001	-0.106	-2.113	0.036	1.411
外商直接投资	X_8	0.001	<0.001	0.436	4.568	<0.001	5.114
工业废水排放量	X_9	-0.052	0.018	-0.175	-2.854	0.005	2.110

2.3.2 回归结果分析 由于工业用水效率值属于截断数据, OLS 线性回归结果可能存在一定的偏差, 故本研究将工业用水综合效率与线性逐步回归所得指标(表 4), 利用逐步回归法, 构建随机效应 Tobit 回归模型. 借助 Stata 17 软件, Tobit 回归结果如表 5 所示.

根据表 5 可以得知:

1) 水资源禀赋对工业用水效率的影响不显著. 人均水资源量的系数过小且不显著, 与何伟等^[22]的研究结果一致. 广东省水资源较为丰富, 受“路径依赖”影响, 广东省工业用水效率受水量影响不显著. 这一结论与传统所认为的工业用水效率与人均水资源量呈负相关关系, 人均水资源量越低, 工业用水效率越高^[24]的观点不太一致, 说明广东省工业企业普遍受

水资源量充足的传统观念和用水习惯影响, 工业用水效率的提高还需转变节水观念, 提高管理水平.

2) 经济发展水平对工业用水效率具有显著的促进作用. 人均 GDP 的 Tobit 回归系数为正, 通过了 1% 显著性检验. 说明经济发展水平较高的地级市拥有更好的经济基础, 能够将更多的资金投入技术研发、产业升级、污水处理和节水等各个方面, 从而降低资源配置利用的成本和提高水资源循环利用水平, 促进工业用水效率的提高.

3) 产业结构对工业用水效率具有显著的促进作用. 工业增加值占地区生产总值比例的系数 >0 , 且在 1% 的水平上显著. 广东省作为工业强省, 2020 年第二产业增加值居全国第 2 位, 工业技术达到了一定的

表5 影响因素 Tobit 回归模型结果

变量	模型1	模型2	模型3	模型4	模型5	模型6	模型7	模型8	模型9
X_1	<0.001	<0.001*	<0.001**	<0.001**	<0.001**	<0.001**	<0.001**	<0.001**	<0.001**
X_2	0.029***	0.047***	0.041***	0.043***	0.063***	0.056***	0.055***	0.056***	0.056***
X_3	—	0.009***	0.010***	0.010***	0.010***	0.011***	0.011***	0.011***	0.011***
X_4	—	—	0.003**	0.003***	0.003**	0.003***	0.003***	0.003***	0.003***
X_5	—	—	—	-0.002	<0.001	-0.001	-0.002	-0.002	—
X_6	—	—	—	—	-0.047***	-0.039***	-0.039***	-0.038***	-0.042***
X_7	—	—	—	—	—	-0.001*	-0.001*	-0.001**	-0.001**
X_8	—	—	—	—	—	—	<0.001	<0.001	—
X_9	—	—	—	—	—	—	—	0.011	—

注: *、**、***分别表示在10%、5%、1%的显著性水平上显著。

高度,工业的发展不再以大量的资源消耗为代价。所以工业增加值占GDP比例增加,意味着产业规模扩大,工业发展水平提升,发展模式逐渐优化,随着节水技术和工业企业管理水平的进步,减少了水资源的浪费和污染,促进了工业用水效率的提高。

4) 产业转型对工业用水效率具有正向促进作用。其中,先进制造业增加值占规模以上工业比例的回归系数>0,且在1%的水平上显著。广东省的工业主要是制造业,全省制造业增加值约占规模以上工业企业增加值的9成以上。先进制造业是在传统制造业的基础上,通过吸收现代高新技术来实现高效、低耗、清洁生产的制造业,大力发展先进制造业是我国产业转型升级规划的重要方向。而先进制造业增加值比例的增加,意味着更优的产业结构和更高效、清洁、低耗的工业生产,以及更高的工业用水效率。因此,广东省应继续优化产业结构,更多地将先进技术投入实际生产中,从而加快产业转型升级,促进经济高质量发展和水资源可持续发展。另外,高技术制造业增加值占规模以上工业比例的回归系数未通过显著性检验,该指标与工业用水效率之间无直接的相关关系。高技术制造业包括医药、航空航天设备、电子通信设备、医疗仪器设备、信息化学品等制造业,这些行业包含了较高的技术含量,但并不都是低耗水的产业,故可以解释高技术制造业增加值比例对工业用水效率无显著影响的现象。

5) 技术创新与工业用水效率为负相关关系。规模以上工业企业R&D经费支出占工业增加值比例的Tobit回归系数为负,通过了1%显著性检验。已有研究也有类似结果,如Chen等^[24]也发现R&D投入比例与工业用水效率呈负相关关系,龚镇杰^[12]发现R&D支出占比对广东省用水效率的提升在粤东地区

呈现为抑制作用。通常我们认为工业用水效率与技术创新呈正相关关系,即研发经费投入越多,工业用水效率越高,但这种认知可能是片面的。可能的解释是:①R&D经费从投入到产出需要一定的周期,研发成果转化为实际应用并取得成效也需要一定的时间。②广东省研发经费占比最大的是计算机、通信和其他电子设备行业,2020年该行业研发经费约占全省的47%,但用水量仅占14%左右;其次是电气机械和器材制造业,研发经费约占全省的14%,但用水量仅占4%左右;相反,造纸业、纺织业等高耗水行业的研发经费占比却远小于用水量占比;因此,大部分研发经费可能对节水无直接或间接的影响,研发经费对节水的效用大大减小。③广东省可能存在科技创新投入结构不合理、科技创新效率不高、科技成果转化率低等问题^[29]。因此,R&D经费投入比例增加,工业用水效率不增反降。但是,结合4)中工业用水效率的分析结果来看,应继续加大技术创新投入,加强节水设施和节水装置的创新和普及。

6) 万元工业增加值用水量与工业用水效率呈负相关,且通过了10%的显著性检验。万元工业增加值用水量作为我国“最严格水资源管理制度”的重要评价指标,值越低,工业用水效率越高。这说明,合理的水资源管理制度将进一步促进工业用水效率的提高。自2012年实施最严格水资源管理制度以来,广东省全省万元工业增加值用水量从2011年的50.0 m³降低到了2020年的20.7 m³,政府和用水主体的节水意识大幅度提升,工业生产方式逐渐由粗放型向集约型转变,工业用水效率有所提高。

7) 外商投资对工业用水效率的影响不显著。外商直接投资的Tobit回归系数<0.001,且不显著。2011—2020年全省外商直接投资占地区生产总值的

比例从 2.56% 下降到 1.46%，外商直接投资对广东省工业的影响整体较小且逐年下降，故外商直接投资对工业用水效率无显著影响。

8) 水污染排放与工业用水效率无相关关系。工业废水排放量的 Tobit 回归系数 >0 ，但不显著，但在线性逐步回归(表 4)中系数 <0 ，故该指标不是本研究的工业用水效率的关键影响因素，对工业用水效率没有显著性影响。

3 结论与建议

本研究利用 DEA-BCC 模型和 DEA-Malmquist 指数对广东省 21 个地级市的工业用水效率进行了测算，并结合 Tobit 回归模型分析了工业用水效率的影响因素，主要结论如下：

1) 2011—2020 年，广东省工业用水效率总体有所提升，2011—2015 年呈上升趋势，2016—2020 年呈波动缓慢下降趋势。

2) 在空间分布上，经济发达的地级市工业用水效率相对较高，经济落后的地级市则相对较低；工业用水效率增长速度由高到低排序依次为粤东、粤北、粤西、珠三角地区，区域内各地级市的工业用水效率变化情况存在差异性。

3) 从分解指数而言，技术进步是这一时期工业用水效率提升的主要因素；规模效率较大程度地影响着工业用水效率的上升和下降；纯技术效率在 2016 年之前影响较大，之后影响减弱。

4) 经济发展水平和产业结构与工业用水效率呈正相关关系；合理的水资源管理政策对工业用水效率的提升有促进作用；技术创新因素与工业用水效率呈负相关关系；水资源禀赋、外商投资、水污染排放等因素与工业用水效率无显著相关关系。

基于以上研究，提出如下建议：

1) 坚持节水优先，完善水资源管理制度。针对东莞市、肇庆市等纯技术效率较低的地级市，如果水资源管理滞后于工业发展，将增大水资源压力，不利于经济和水资源的可持续发展。因此，各地级市在制定政策时应坚持以水定产，严格工业计划用水和用水定额管理，同时加强节水监督管理与节水宣传教育。在现有的广东省水权交易管理试行办法和水资源税征收标准的基础上：继续完善水权、水价、水资源税制度，建设水权交易平台，激活水资源市场交易；健全水价动态调整机制，充分发挥水价对用水效率的调节作用；重点从高耗水、高污染企业入手，通过征收水资源税促使企业提高用水效率。

2) 加大科技研发投入，创新驱动工业节水。研究表明，科技进步是工业用水效率长效提升的关键因素。因此政府和企业要进一步加大科技投入，监督和落实研发资金的使用，缩短科技创新成果转化为生产实际的周期，提高成果转化应用率；继续推进节水设备和装置的创新和普及，加快各产业向绿色、低耗的方向转型，提高用水效率。政府还可针对节水动力不足的中小微企业推出科技投入优惠政策，鼓励积极创新，升级生产设备和节水装置。分区域看，珠三角地区应充分利用其经济实力和人才优势，积极创新，加速产业高端化、智能化和绿色化，同时带动资金和人才都较为欠缺的非珠三角地区。

3) 加快工业转型升级，引导产业集群化发展。立足供给侧结构性改革，继续优化升级产业结构，提升工业比例和先进制造业比例，发挥其在促进工业用水效率提升方面的积极作用。依托《广东省制造业高质量发展“十四五”规划》，优化产业布局，推进各产业转向集群化发展，建设生产效率高、废水集中处理的节水型工业园区，充分发挥规模效应对提高经济效益和工业用水效率的作用。对于珠三角地区，工业用水的规模效率较高但呈逐年下降趋势，应当优化产业结构和产业布局，适当将产业外溢和转移，从而优化生产要素配置，避免规模不经济，推动经济高质量发展；对于粤东、粤西、粤北地区，工业用水效率较低但增长良好，应当继续推进工业转型升级，发挥各地区的产业特色和扩大产业规模，同时结合珠三角产业转移，深化与珠三角区域合作，构建新发展格局，从而促进工业用水效率的提高。

由于数据获取等限制，本研究所选取的评价指标和影响因素指标尚有不足，后续还需从生态、环境等方面进一步丰富指标。此外，本研究从工业整体对用水效率进行研究，但暂未对具体行业剖析用水效率，未来将进一步收集数据对具体行业用水进行深入分析。

4 参考文献

- [1] 朱玲億, 潘钰霞, 吴易桐, 等. 工业集聚下中国工业用水效率和重心迁移研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2022, 44(2): 286
- [2] ZHOU Z X, WU H Q, SONG P F. Measuring the resource and environmental efficiency of industrial water consumption in China: a non-radial directional distance function[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 240: 118169
- [3] 张黎鸣, 王红瑞, 潘成忠, 等. 资源型地区产业结构调整对水资源利用效率影响的实证分析: 来自中国 10 个资源型省

- 份的经验证据[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(3): 353
- [4] 史毅超, 唐彦, 唐德善, 等. 基于DEA和Malmquist指数的浙江省用水效率分析[J]. 人民长江, 2018, 49(9): 35
- [5] 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
- [6] 左其亭, 张志卓, 马军霞. 黄河流域水资源利用水平与经济社会发展的关系[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(10): 29
- [7] 丁绪辉, 贺菊花, 王柳元. 考虑非合意产出的省际水资源利用效率及驱动因素研究: 基于SE-SBM与Tobit模型的考察[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(1): 157
- [8] 秦腾, 佟金萍, 章恒全. 环境约束下中国省际水资源效率空间关联网络构建及演化因素[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(12): 84
- [9] 胡彪, 侯绍波. 京津冀地区城市工业用水效率的时空差异性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(7): 1
- [10] 何佳音, 王红瑞. 湖南省工业用水效率影响因素分析及结构调整对策[J]. 水电能源科学, 2022, 40(7): 53
- [11] 黎锐锋. 基于随机前沿分析的广东省工业用水效率及节水潜力研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015
- [12] 龚镇杰. 广东省用水效率时空格局演变及其成因研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2022
- [13] 晏琪. 广东省区域水资源利用效率及其影响因素分析[D]. 广州: 中共广东省委党校, 2020
- [14] 龚镇杰, 何艳虎. 区域用水效率关联度时空演变及影响因素[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(3): 477
- [15] 刘莉, 汪丽娜. 基于地理探测器的广东省水资源利用效率影响因素研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(4): 40
- [16] 洪思扬, 王红瑞, 程涛. 广东省水与能源利用效率与部门使用特征分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2022, 58(1): 107
- [17] CHARNES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. *European Journal of Operational Research*, 1978, 2(6): 429
- [18] 曹思齐, 吴成国, 金菊良, 等. 最严格水资源管理制度下的区域工业用水效率预测[J]. 水电能源科学, 2014, 32(8): 56
- [19] GENG Q L, REN Q F, NOLAN R H, et al. Assessing China's agricultural water use efficiency in a green-blue water perspective: a study based on data envelopment analysis[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 96: 329
- [20] FÄRE R, GROSSKOPF S, NORRIS M, et al. Productivity growth, technical progress, and efficiency change in industrialized countries[J]. *The American Economic Review*, 1994, 84(1): 66
- [21] 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
- [22] 何伟, 王语苓. 黄河流域城市水资源利用效率测算及影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2021, 41(11): 4760
- [23] 李玲, 周玉玺. 基于DEA-Malmquist模型的中国粮食生产用水效率研究[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(11): 192
- [24] CHEN Y B, YIN G W, LIU K. Regional differences in the industrial water use efficiency of China: the spatial spillover effect and relevant factors[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 167: 105239
- [25] 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
- [26] 姬志恒, 于伟. 中国工业用水效率的空间差异及驱动机制[J]. 工业技术经济, 2022, 41(12): 86
- [27] 付俊怡, 李鸿雁. 黄河流域农业用水效率及影响因素时空异质性研究[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(11): 77
- [28] 田贵良, 高廷艳. 水资源税改革对缺水地区工业用水效率的影响[J]. 资源与产业, 2022, 24(3): 43
- [29] 张婷, 王玮蓉, 姚昀辰. 中国31个省(区、市)及重点省域科技创新效率评价研究: 基于超效率SBM-Malmquist模型[J]. 科技管理研究, 2023, 43(3): 87

Industrial water use efficiency and influencing factors in Guangdong Province

ZHOU Guihuan YU Jingshan WANG Xianyang

(College of Water Science, Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

Abstract Water resource shortage restricts sustainable socio-economic development and industrial development in Guangdong Province. To study efficiency of industrial water use and influencing factors is of great significance to alleviate water resource pressure and to achieve sustainable use of water resources. Panel data of 21 prefecture-level cities in Guangdong Province from 2011 to 2020 were analyzed with BBC model and data envelopment method. Tobit

regression model was used to analyze influencing factors of industrial water use efficiency (IWUE). It was found that from 2011 to 2020, overall IWUE in Guangdong improved, showing an upward trend from 2011 to 2015 and a slow fluctuating downward trend from 2016 to 2020. Cities with better economies were found to have relatively high IWUE, while those with lower economy development level had relatively low IWUE. Growth rate of IWUE showed an order of eastern Guangdong > northern Guangdong > western Guangdong > Pearl River Delta region. Differences in the changes of IWUE were confirmed among cities. Technological progress was found to be the main factor to improve IWUE, and scale efficiency greatly affected the rise and fall of IWUE. Level of economic development and industrial structure were significantly positively correlated with IWUE. Reasonable water resources management policies could improve IWUE, while technological innovation factors were negatively correlated to change in IWUE. Technological innovation and water resources management policies had significantly negative effects on industrial water use efficiency. We suggest that priority be given to water conservation, to improve the water resources management system, to increase investment in science and technology, to accelerate industrial transformation, and to improve industrial water use efficiency.

Keywords industrial water use efficiency; DEA model; Tobit model; influencing factors; Guangdong Province

【责任编辑: 武 佳】