

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.020

黄河流域城市群水资源利用效率评估及驱动因子分析

朱晓梅^{1,2},魏加华^{1,2,3},杨海娇^{1,2},吴国宏^{1,2},康倍铭^{1,2},唐晨洋^{1,2},杨梦瑶^{1,2}

(1. 青海大学水利电力学院,青海 西宁 810016; 2. 黄河上游生态保护与高质量发展实验室,青海 西宁 810016;
3. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室,北京 100084)

摘要:为客观评价黄河流域城市群水资源利用效率,分析水资源利用效率差异的原因,以黄河流域7大城市群为研究对象,1989—2018年48个大中型城市GDP、人口、地区用水量等为统计指标,采用super-SBM模型评估黄河流域城市群静态水资源利用效率,结合Malmquist全要素生产率指数对水资源利用效率进行动态分解,选用Tobit模型分析城市群整体水资源利用效率的驱动因子。结果表明:1989年以来,7大城市群水资源利用效率整体提升,2000年以来提升幅度较大;节水和技术进步共同推动了Malmquist指数的提升,经济发展水平对黄河流域水资源利用效率的提升有显著的促进作用,产业结构和人口密度分别有抑制和轻微抑制作用。

关键词:水资源利用效率;城市群;super-SBM模型;Malmquist指数;驱动因子;黄河流域

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)01-0153-07

Evaluation and driving factor analysis of water resources utilization efficiency of urban agglomerations in the Yellow River Basin // ZHU Xiaomei^{1,2}, WEI Jiahua^{1,2,3}, YANG Haijiao^{1,2}, WU Guohong^{1,2}, KANG Beiming^{1,2}, TANG Chenyang^{1,2}, YANG Mengyao^{1,2} (1. School of Water Resources and Electric Power, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Laboratory of Ecological Protection and High Quality Development in the Upper Yellow River, Xining 810016, China; 3. State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to objectively evaluate the water resources utilization efficiency of urban agglomerations in the Yellow River Basin and analyze the reasons for the difference in water resources utilization efficiency, seven major urban agglomerations in the Yellow River Basin were taken as the research objects. With the GDP, population, and regional water consumption in 48 large- and medium-sized cities from 1989 to 2018 used as the statistical indicators, the super-SBM model was employed to assess the static water resources utilization efficiency, and the dynamic decomposition of the efficiency was conducted with the Malmquist index. Then, the Tobit model was used to analyze the driving factors of the water resources utilization efficiency. The results show that the water resources utilization efficiency in seven large urban agglomerations has increased since 1989, with a significant increase since 2000; water conservation and technological progresses jointly promote the increase of the Malmquist index, economic development plays a remarkable role in improving the water resources utilization efficiency in the Yellow River Basin, while the industrial structure and population density show inhibiting and slightly inhibiting effects, respectively.

Key words: water resources utilization efficiency; urban agglomeration; super-SBM model; Malmquist index; driving factor; the Yellow River Basin

黄河流域横跨我国温带季风、大陆干旱和高寒三大气候带,连接青藏高原、黄土高原、华北平原,是“丝绸之路”经济带和欧亚大陆桥的重要走廊。黄河流域内有多个城市群和国家级经济区,是我国重

要的粮食和能源基地,也是我国推进西部大开发,形成新格局的主体承载区,在我国经济格局中具有沟通南北方、协同东中西的作用。黄河流域7大城市群的经济总量占整个流域的70%以上,聚集了流域

基金项目:青海省科学技术厅重点研发与转化计划(2019-SF-146);清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开放基金(sklhse-2019-B-03)

作者简介:朱晓梅(1989—),女,讲师,硕士,主要从事水文水资源研究。E-mail: xmzhu1989@163.com

通信作者:魏加华(1971—),男,教授,博士,主要从事水资源与水信息研究。E-mail: Weijiahua@tsinghua.edu.cn

内 60% 以上的人口,供水总量占流域总耗水量的 14% 左右。1990 年以来,沿黄九省(区)GDP 增长了近 50 倍;2000 年以来流域内植被覆盖率持续增长,归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)平均每 10 a 增长 0.055^[1]。面对国家实施的黄河流域生态保护和高质量发展重大战略,水资源保障形势严峻、发展质量有待提高。新时期国家提出“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水方针,在水资源刚性约束下,水资源利用效率的提升,是落实节水优先、支撑社会经济高质量发展的重要举措。

水资源利用效率是指单位水资源所带来的经济、社会或生态等效益^[2],是衡量水资源利用水平的重要指标^[3-4],亦是反映节水效能的重要指标,具有复杂性^[5]、系统性^[6]、投入产出性^[7]和相对有效性^[8]等特性。常用的评价方法有指标体系评价法、随机前沿分析法(stochastic frontier analysis, SFA)和数据包络分析法(data envelopment analysis, DEA)等。孙爱军等^[9]基于生产函数,运用 SFA 对我国工业用水技术效率进行了分析。李世祥等^[10]选用比值分析法对我国东、中、西部各省(市、区)水资源利用效率进行了分析。刘晓君等^[11]基于松弛测度(slack based measure, SBM)-undesirable 超效率包络法分析了我国西部各省(市、区)水资源利用效率的动态演化趋势,选用 Tobit 模型进行了影响因素研究。郭一鸣等^[12]基于两阶段 super-SBM 模型分析了我国城市的能源效率空间特征,并从内生因素和外部环境剖析了影响因素。左其亭等^[13]结合 super-DEA 模型得出黄河流域九省(区)2012—2018 年水资源利用效率总体呈增加趋势,用水水平具有显著空间差异性,并通过 Malmquist 全要素生产率指数(下称 Malmquist 指数)分解水资源利用效率,分析效率变动的内在原因,得出九省(区)水资源利用效率的提升主要得益于技术进步。

DEA 是一种非参数相对效率评价方法,可评价多投入、多产出的效率问题,不需统一量纲、估计生产函数、确定权重,操作性强,可得到内涵丰富的测度结果。在处理多目标决策问题时,DEA 可针对每个决策单元进行优化,对分析结果进行排序,并提供具体的优化建议,具有更好的适用性^[14-15]。本文以黄河流域 7 大城市群(48 个大中型城市)为研究对象,从投入产出视角对 1989—2018 年城市群水资源利用效率进行研究,采用 super-SBM 模型评估静态水资源利用效率,结合 Malmquist 指数对水资源利用效率进行动态分解,选用 Tobit 回归模型探讨 7 大城市群水资源利用效率整体变化的驱动因子。

1 数据来源与指标构建

1.1 数据来源

数据主要来源于《中国城市统计年鉴》(1990—2019 年)、国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)和水资源公报等。研究对象为城市区域(即市辖区)(图 1),以非农业产业为主,故本研究剔除了辖区内农业用水的输入和输出。依据国务院印发的《关于调整城市规模划分标准的通知》,以城区常住人口为统计口径,将城市划分为五类七档。按 2017 年城区常住人口统计,沿黄省(区)有 75 个大中型城市,选择 48 个较具备研究条件的大中型城市作为黄河流域 7 大城市群的研究对象。

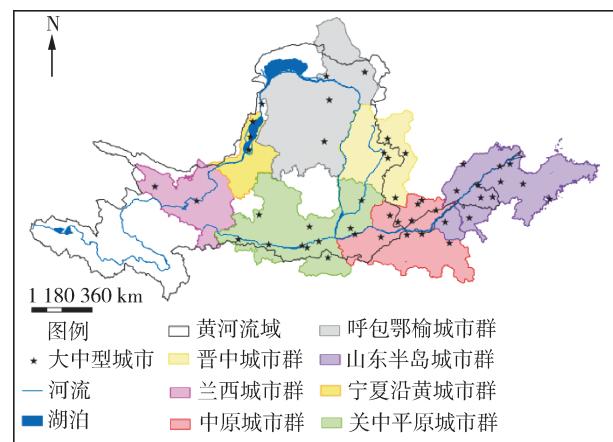


图 1 黄河流域 7 大城市群

Fig. 1 Seven large urban agglomerations in the Yellow River Basin

1.2 指标构建

从投入产出和水资源消耗关系出发,以单位水资源消耗产生的经济效益衡量水资源利用效率,选择直接反映经济产出的地区生产总值作为产出指标,地区供水总量作为反映自然资源要素的投入指标,固定资产投资作为反映资本要素的投入指标,地区从业人员(当年年末与上年度年末从业人员的平均值)作为反映劳动力要素的投入指标^[14-18]。

基于数据可获得性,选取经济发展水平、产业结构、人口密度和科技创新作为水资源利用效率的驱动因子。经济发展水平用人均 GDP 衡量,经济发展水平与水资源保护和利用政策密切相关,直接影响水资源利用效率;产业结构对水资源利用效率有控制性作用,减少高耗水产业,增加低耗水产业,可显著提升水资源利用效率;人口密度直观反映地区的紧凑程度,建设紧凑型城市可更好地实施自然资源集约化,降低水资源消耗;科技创新对水资源利用效率提升有助推作用^[19-20]。

建立的水资源利用效率和驱动因子指标体系如图 2 所示。

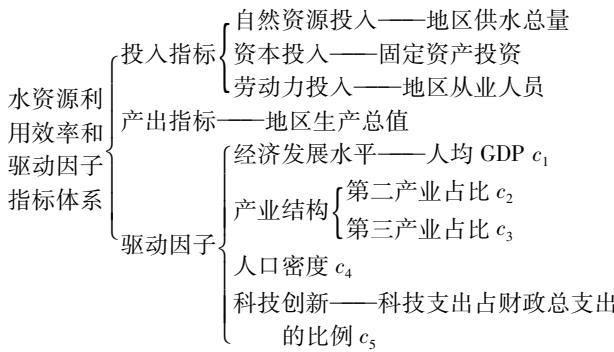


图 2 水资源利用效率和驱动因子的指标体系

Fig. 2 Index system of water resources utilization efficiency and driving factors

2 研究方法

2.1 super-SBM 模型

DEA 测算的是相对效率, 径向 DEA 对无效率程度测算仅限于所有投入(产出)等比例缩减(增加)的比例, 为此, Tone^[21]提出的 SBM 模型解决了径向 DEA 对无效率测量不包含松弛变量的问题。针对 SBM 测出效率最大值为 1, 且对于同为 1 的效率值无法进一步区分效率高低的问题, Tone^[22]又提出了 super-SBM 模型(式(1)(2)), 其核心思想是将被评价的决策单元(decision making unit, DMU)分为参考组和待评价组, 待评价组 DMU 效率值基于参考组的前沿计算得出, 因此待评价组的有效 DMU 效率值通常会大于 1。

$$\min \theta = \frac{1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i^- / x_{ik}}{1 - \frac{1}{s} \sum_{r=1}^s s_r^+ / y_{rk}} \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{j=1, j \neq k}^n x_{ij} \lambda_j - s_i^- \leq x_{ik} \\ \sum_{j=1, j \neq k}^n y_{rj} \lambda_j + s_r^+ \geq y_{rk} \\ \lambda_j, s_i^-, s_r^+ \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ 为目标效率值; x_{ik} 为评价单元 k 的投入指标 i 值; y_{rk} 为评价单元 k 的产出指标 r 值; n 为被评价单元数, 本文取 $n = 48$; m 为投入指标数, 本文取 $m = 3$; s 为产出指标数, 本文取 $s = 1$; s_i^- 为投入指标 i 的松弛变量; s_r^+ 为产出指标 r 的松弛变量; λ_j 为被评价单元 j 的线性组合系数。

2.2 Malmquist 指数

DEA 模型通常只能测算单一时期 DMU 效率, 当数据包含多个时间节点时, 应将技术效率和技术进步对水资源利用效率所起的作用进行分解。因

此, 将 Malmquist 指数分解为技术效率变化(technical efficiency change, TEC)指数和生产技术变化(technological change, TC)指数:

$$M_{k,t \rightarrow t+1} = \left(\frac{D_{k,t \rightarrow t+1}}{D_{k,t}} \frac{D_{k,t+1}}{D_{k,t+1-t}} \right)^{1/2} = \frac{D_{k,t+1}}{D_{k,t}} \left(\frac{D_{k,t}}{D_{k,t+1-t}} \frac{D_{k,t \rightarrow t+1}}{D_{k,t+1}} \right)^{1/2} = C_{TEk,t \rightarrow t+1} C_{Tk,t \rightarrow t+1} \quad (3)$$

式中: $M_{k,t \rightarrow t+1}$ 为评价单元 k 从 t 到 $t+1$ 时刻 Malmquist 全要素生产率变化率, 即 Malmquist 指数; $D_{k,t}$ 、 $D_{k,t+1}$ 分别为评价单元 k 在 t 、 $t+1$ 时刻的技术效率值; $D_{k,t \rightarrow t+1}$ 为评价单元 k 以 t 时刻为参考, 得到的 $t+1$ 时刻的技术效率值; $D_{k,t+1-t}$ 为评价单元 k 以 $t+1$ 时刻为参考, 得到的 t 时刻的技术效率值; $C_{TEk,t \rightarrow t+1}$ 为评价单元 k 从 t 到 $t+1$ 时刻技术效率变化率, 即 TEC 指数; $C_{Tk,t \rightarrow t+1}$ 为评价单元 k 从 t 到 $t+1$ 时刻生产技术的变化率, 即 TC 指数。 $M_{k,t \rightarrow t+1}$ 、 $C_{TEk,t \rightarrow t+1}$ 、 $C_{Tk,t \rightarrow t+1}$ 大于 1 则效率(或技术)提高, 小于 1 则效率(或技术)降低。

2.3 Tobit 模型

将驱动因子作为自变量, 水资源利用效率值作为因变量, 建立 Tobit 回归模型:

$$d' = \beta_0 + \sum_{j=1}^5 c_j \beta_j + \varepsilon \quad (4)$$

$$d = \begin{cases} d' & d' \geq 0 \\ 0 & d' < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: d' 为原始因变量, 即水资源利用效率的实际测算值; d 为截断因变量; c_j 为驱动因子 j 的值; β_0 为常数项; β_j 为驱动因子 j 的回归系数; ε 为误差项, 独立且服从正态分布。

3 结果与分析

3.1 基于 super-SBM 模型的静态水资源利用效率

采用 super-SBM 模型测算 48 个大中型城市水资源利用效率, 得到 7 大城市群不同时期水资源利用效率均值(表 1), 结果表明, 与 1989—1990 年相比, 2016—2018 年 7 大城市群水资源利用效率均值整体提升了 0.12。

青海人均水资源量大, 但水资源利用条件差; 甘肃水资源开发利用难度大。兰西城市群经济发展水平总体偏低, 科技和城市节水投入不足, 技术落后, 水资源利用效率偏低, 1989—2018 年水资源利用效率在流域中处于最低水平, 均值 0.42; 水资源利用效率从 1989—1990 年的 0.39 提升到 2016—2018 年的 0.43, 整体稳定提升, 但增幅不大。

山东半岛和呼包鄂榆城市群水资源利用效率均

表1 黄河流域7大城市群不同时期水资源利用效率

Table 1 Water resources utilization efficiency of seven large urban agglomerations in the Yellow River Basin in different periods

时期	山东半岛城市群	中原城市群	关中平原城市群	晋中城市群	呼包鄂榆城市群	宁夏沿黄城市群	兰西城市群
1989—1990年	0.84	0.41	0.63	0.49	0.63	0.51	0.39
1991—1995年	0.86	0.57	0.63	0.64	0.79	0.65	0.47
1996—2000年	0.91	0.64	0.73	0.59	0.77	0.69	0.37
2001—2005年	0.77	0.47	0.74	0.61	0.76	0.43	0.42
2006—2010年	0.81	0.50	0.74	0.58	0.84	0.70	0.46
2011—2015年	0.75	0.47	0.69	0.56	1.13	0.77	0.43
2016—2018年	0.79	0.45	0.66	0.60	0.90	0.89	0.43
1989—2018年	0.82	0.50	0.69	0.58	0.83	0.66	0.42

处于较高水平,均值分别为0.82和0.83。山东半岛城市群地处沿海地区,经济发展水平位于全国前列,水资源利用效率处于流域较高水平,2000年以来出现波动,2006—2010年山东半岛城市群把工业节水确定为节水型社会建设的重点,水资源利用效率提高到0.81,2011—2015年以水资源消耗为代价的经济快速发展导致水资源利用效率略有下降,2016—2018年顺应国家提出的绿色、创新、协调、开放、共享五大发展理念,水资源利用效率回升到0.79。

呼包鄂榆城市群水资源利用效率从1989—1990年的0.63稳步提升,1991—2010年较稳定,均值为0.79,2011—2015年,城市群第三产业占比显著提高,群众节水意识增强,城市群通过大批建设工业园区和产业集中区,实施创新驱动发展战略,优势产业装备技术达国内先进水平,使呼包鄂榆城市群水资源利用效率达到1.13,2016—2018年略有下降,但仍达到0.90。

关中平原、晋中和中原城市群水资源利用效率总体平稳。关中平原城市群水资源利用效率维持在0.63~0.74,整体接近0.69;晋中城市群整体提升幅度相对较大,从1989—1990年的0.49提升到2016—2018年的0.60;中原城市群人口数量大、城市群空间大、分布相对分散、供水管网漏损严重,水资源利用效率在流域中偏低,均值为0.50。

宁夏沿黄城市群水资源利用效率均值为0.66,处于流域中等水平,但波动较大,从1989—1990年

的0.51持续增长到1996—2000年的0.69,2001—2005年可能由于用水结构不合理、污水排放量大等原因,导致水资源利用效率降低,2006年以来通过政策调控,水资源利用效率持续增长,2016—2018年达到0.89。

3.2 基于Malmquist指数的水资源利用效率动态分解

从表2的Malmquist指数变化分析发现,黄河流域7大城市群Malmquist指数基本大于1,表明黄河流域主要城市水资源利用效率整体提升。从空间分布看,下游城市群水资源利用效率高于中游,上游兰西城市群水资源利用效率相对较低;从时间分布看,水资源利用效率提升幅度略有差异,2000年以来水资源利用效率提升幅度较大。近30年来,山东半岛城市群水资源利用效率呈略降—较大提升—大幅提升;中原和关中平原城市群呈略降—较大提升—稳定提升—大幅提升;晋中城市群呈持续提升,增幅变化较大;呼包鄂榆城市群呈稳定提升—较大提升—稳定提升;宁夏沿黄和兰西城市群呈基本不变—稳定提升。

从TEC指数和TC指数看(表3和表4),1990—2018年黄河流域7大城市群TC指数的均值为1.10,表明7大城市群水资源利用技术整体不断提升,2016年后快速发展,TC指数均值达到1.39;1990—2018年7大城市群TEC指数在1.0附近波动,均值为1.04,需因时因地调整产业结构、用水结构和水资源管理模式。技术效率提高和技术进步均

表2 黄河流域7大城市群Malmquist指数

Table 2 Malmquist index for seven large urban agglomerations in the Yellow River Basin

时期	山东半岛城市群	中原城市群	关中平原城市群	晋中城市群	呼包鄂榆城市群	宁夏沿黄城市群	兰西城市群
1990年	0.99	0.99	0.96	1.05	1.05	0.94	1.05
1991—1995年	0.94	0.94	0.90	1.16	0.93	0.92	0.97
1996—2000年	1.17	1.20	1.14	1.00	1.05	1.03	1.07
2001—2005年	1.08	1.05	1.00	1.13	1.14	1.07	1.10
2006—2010年	1.11	1.08	1.05	1.04	1.19	1.09	1.14
2011—2015年	1.26	1.03	1.05	1.01	1.09	1.11	1.08
2016—2018年	1.47	1.38	1.31	1.69	1.03	1.57	1.24
1989—2018年	1.15	1.10	1.06	1.15	1.07	1.10	1.09

表3 黄河流域7大城市群TEC指数

Table 3 TEC index for seven large urban agglomerations in the Yellow River Basin

时期	山东半岛城市群	中原城市群	关中平原城市群	晋中城市群	呼包鄂榆城市群	宁夏沿黄城市群	兰西城市群
1990年	1.02	1.01	1.00	0.98	1.25	0.90	1.11
1991—1995年	1.07	1.18	1.06	1.19	1.04	1.15	1.07
1996—2000年	1.05	1.08	1.09	0.96	1.01	0.94	0.95
2001—2005年	0.96	0.98	0.98	1.10	1.05	1.08	1.11
2006—2010年	1.04	1.05	1.02	0.97	1.11	1.10	1.00
2011—2015年	0.99	0.98	1.00	0.96	1.04	1.05	1.01
2016—2018年	1.10	1.00	0.98	1.06	0.84	1.07	0.99
1989—2018年	1.03	1.04	1.02	1.03	1.05	1.04	1.03

表4 黄河流域7大城市群TC指数

Table 4 TC index for seven large urban agglomerations in the Yellow River Basin

时期	山东半岛城市群	中原城市群	关中平原城市群	晋中城市群	呼包鄂榆城市群	宁夏沿黄城市群	兰西城市群
1990年	1.05	0.99	0.96	1.08	0.86	1.05	0.95
1991—1995年	0.95	0.88	0.88	0.95	0.92	0.83	0.93
1996—2000年	1.16	1.12	1.12	1.07	1.07	1.20	1.17
2001—2005年	1.14	1.10	1.07	1.10	1.11	1.07	1.00
2006—2010年	1.10	1.07	1.06	1.13	1.11	1.04	1.19
2011—2015年	1.24	1.09	1.07	1.10	1.06	1.06	1.12
2016—2018年	1.35	1.40	1.33	1.62	1.28	1.46	1.29
1989—2018年	1.14	1.09	1.07	1.15	1.06	1.10	1.09

推动了Malmquist指数的提升,表明城市群在引进先进技术、提高管理水平和优化生产规模方面不断进步,其中技术进步是主导因素。30年来,7大城市群的技术效率提升幅度差距不大,而山东半岛和晋中城市群的Malmquist指数及TC指数提升幅度较大,能源和重工业的创新和技术水平大幅提升,中上游地区由于产业结构、人口分布、气候和地理条件等影响,水资源利用效率提升幅度相对较小。

1990年以来,7大城市群技术效率总体稳中求进,1996—2000年宁夏沿黄和兰西城市群有轻微衰退,用水结构和产业结构出现不匹配情况,2016年以来呼包鄂榆城市群电力、煤炭和化工等高耗水产业急剧增加,导致技术效率下降。1995年以来,国家调整水资源开发利用管理策略,不断提出新的用水理念,强调水资源供给侧改革,使得技术进步对黄河流域7大城市群水资源利用效率提升起到显著的推动影响,但少数城市群技术效率的下降抵消了同时期技术进步带来的水资源利用效率的

提升程度。

3.3 水资源利用效率驱动因子分析

采用Tobit回归模型分析驱动因子(图2)对7大城市群整体水资源利用效率的影响程度。不同时期的驱动因子值见表5,回归分析结果见表6。

经济发展水平代表生产、管理技术及产业集聚效应等水平,1989—2018年7大城市群人均GDP增长了数十倍,经济发展水平对推动黄河流域城市群水资源利用效率提升起着显著的促进作用,各时期的回归系数均通过1%显著水平检验。

1989年以来,第三产业占比逐步上升,2016—2018年达52.21%,比第二产业占比高出6.82%;1989—2018年7大城市群的第二产业占比变化不大。回归分析结果显示,产业结构变化对城市群水资源利用效率变化起着较小的抑制作用,表明黄河流域城市群的工业水平尚处于初级阶段,增长方式属粗放型的扩大再生产,流域城市群的水资源消耗量大,整体水资源利用效率有待提高,有较大的节水空间。

表5 黄河流域城市群不同时期驱动因子

Table 5 Driving factors of urban agglomerations in the Yellow River Basin in different periods

时期	人均GDP/万元	人口密度/(人·km ⁻²)	科技与财政支出比	第二产业占比/%	第三产业占比/%
1989—1990年	0.25	978.74	<0.01	49.13	22.62
1991—1995年	0.46	1022.88	0.01	51.06	29.63
1996—2000年	1.14	1250.57	0.01	54.18	38.81
2001—2005年	1.72	1130.47	0.01	52.32	40.95
2006—2010年	3.72	1139.88	0.01	51.07	43.75
2011—2015年	6.58	1155.43	0.02	49.13	46.19
2016—2018年	7.93	1097.50	0.02	45.39	52.21

表 6 不同时期 Tobit 回归分析结果
Table 6 Tobit regression analysis results in different periods

时期	回归系数					常数项
	人均 GDP	人口密度	科技与财政支出比	第二产业占比	第三产业占比	
1989—1990 年	1.009 45 ***	-0.000 08 *		-0.005 06 **		0.545 18 **
1991—1995 年	0.346 67 ***	-0.000 10 ***		-0.006 78 ***		0.8728 8 ***
1996—2000 年	0.222 63 ***			-0.027 23 ***	-0.029 32 ***	3.091 63 ***
2001—2005 年	0.055 19 ***	-0.000 09 ***	4.660 83 *	-0.008 39 ***	-0.005 51 *	1.254 42 ***
2006—2010 年	0.036 60 ***	-0.000 12 ***		-0.014 02 ***	-0.012 07 ***	1.884 04 ***
2011—2015 年	0.030 52 ***	-0.000 09 ***	-2.861 15 *	-0.013 94 ***	-0.010 18 ***	1.753 61 ***
2016—2018 年	0.014 81 ***	-0.000 15 ***				

注: ***、**、* 分别表示通过 1%、5% 和 10% 显著水平检验。

人口密度的变化受基数和国家政策影响较大,变化趋势显著,人口密度的增加对流域内水资源利用效率总体呈现轻微的抑制作用,2000 年以后,回归系数均通过 1% 显著水平检验,反映出居民节水意识有待加强。

科技创新的回归系数在 2001—2005 年和 2011—2015 年通过 10% 显著水平检验,表明黄河流域城市群还需要加强科学技术在水资源利用效率提升方面的支撑力度。技术进步推动了城市群整体水资源利用效率的提升,但科技创新的影响不显著,两者结果差异与上中游和中下游各城市群科技创新投入力度差异大等因素有关。

4 结 论

a. 7 大城市群水资源利用效率提升幅度略有差异,2000 年以来提升幅度较大。下游城市群水资源利用效率整体高于中上游城市群,上游兰西城市群水资源利用效率相对较低。技术效率提高和技术进步均推动了水资源利用效率的提升,其中技术进步是主导因素,这与我国稳步推进节水型社会建设、实施水价改革、推行最严格水资源管理制度和节水优先战略密不可分。

b. 1989—2018 年 7 大城市群人均 GDP 增长了数十倍,经济发展水平显著促进了城市群水资源利用效率的提升。7 大城市群的产业整体水资源消耗量逐步趋稳,产业结构对城市群水资源利用效率的提升有抑制作用;居民节水意识薄弱,导致人口密度对水资源利用效率的提升起轻微抑制作用。黄河流域城市群需加大科技投入,工业向创新型、集约化用水方式转变,通过节水科普、阶梯水价等途径提高节水水平。

c. 2016—2018 年 7 大城市群水资源利用效率均值为 0.67,空间差异大,中上游水资源利用效率较低,在黄河水资源刚性约束下,需强化节水型社会建设,重视城市群经济发展水平和水资源禀赋差异,提高水资源利用效率,稳步推进黄河流域生态保护

和高质量发展。

参 考 文 献:

- [1] 孙高鹏,刘宪锋,王小红,等. 2001—2020 年黄河流域植被覆盖变化及其影响因素 [J]. 中国沙漠,2021,41(4): 205-212. (SUN Gaopeng, LIU Xianfeng, WANG Xiaohong, et al. Changes in vegetation coverage and its influencing factors across the Yellow River Basin during 2001-2020 [J]. Journal of Desert Research,2021,41(4): 205-212. (in Chinese))
- [2] 赵良仕,孙才志,郑德凤. 中国省际水资源利用效率与空间溢出效应测度 [J]. 地理学报,2014,69(1):121-133. (ZHAO Liangshi, SUN Caizhi, ZHENG Defeng. Water resource utilization efficiency and its spatial spillover effects measure in China [J]. Acta Geographica Sinica,2014,69(1):121-133. (in Chinese))
- [3] KARAGIANNIS G, TZOUVELEKAS V, XEPAPADEAS A. Measuring irrigation water efficiency with a stochastic production frontier [J]. Environmental and Resource Economics,2003,26(1):57-72.
- [4] ZHANG Tian, PENG Jian, LIANG Wei, et al. Spatial-temporal patterns of water use efficiency and climate controls in China's Loess Plateau during 2000-2010 [J]. Science of the Total Environment,2016,565:105-122.
- [5] BERGER T, BIRNER R, MCCARTHY N, et al. Capturing the complexity of water uses and water users within a multi-agent framework [J]. Water Resources Management,2007,21(1):129-148.
- [6] 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]. 大连:辽宁师范大学,2014.
- [7] LI Guijun, HUANG Daohan, LI Yulong, et al. China's input-output efficiency of water-energy-food nexus based on the data envelopment analysis (DEA) model [J]. Sustainability,2016,8(9):927-942.
- [8] CAMPBELL H E, JOHNSON R M, LARSON E H. Prices, devices, people or rules: the relative effectiveness of policy instruments in water conservation [J]. Review of Policy Research,2004,21(5):637-662.

- [9] 孙爱军,董增川,王德智. 基于时序的工业用水效率测算与耗水量预测 [J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36 (4) : 547-553. (SUN Aijun, DONG Zhengchuan, WANG Dezhi. Prediction of technical efficiency and water consumption of industrial water in China based on time series [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(4) :547-553. (in Chinese))
- [10] 李世祥,成金华,吴巧生. 中国水资源利用效率区域差异分析 [J]. 中国人口·资源与环境, 2008, 18 (3) :215-220. (LI Shixiang, CHENG Jinhua, WU Qiaosheng. Regional difference of the efficiency of water usage in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2008, 18 (3) :215-220. (in Chinese))
- [11] 刘晓君,闫俐臻. 基于数据包络模型的西部水资源利用效率及影响因素研究 [J]. 水资源保护, 2016, 32 (6) : 32-38. (LIU Xiaojun, YAN Lizhen. Research on water resources utilization efficiency and factors in western China based on data envelopment model [J]. Water Resources Protection, 2016,32(6) :32-38. (in Chinese))
- [12] 郭一鸣,蔺雪芹,王岱. 中国城市能源效率空间演化特征及影响因素:基于两阶段 Super SBM 的分析 [J]. 地域研究与开发, 2020, 39 (2) :8-13. (GUO Yiming, LIN Xueqin, WANG Dai. Spatial evolution and influencing factors of energy efficiency in Chinese cities based on two-stage super efficiency SBM [J]. Areal Research and Development,2020,39(2):8-13. (in Chinese))
- [13] 左其亭,张志卓,姜龙,等. 全面建设小康社会进程中黄河流域水资源利用效率时空演变分析 [J]. 水利水电技术, 2020, 51 (12) : 16-25. (ZUO Qiting, ZHANG Zhizhuo, JIANG Long, et al. Spatio-temporal evolution of water resource utilization efficiency in the Yellow River Basin during the construction of a well-off society [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51 (12) :16-25. (in Chinese))
- [14] 张永凯,孙雪梅. 黄河流域水资源利用效率测度与评价 [J]. 水资源保护, 2021, 37 (4) : 37-43. (ZHANG Yongkai, SUN Xuemei. Measurement and evaluation of water resources utilization efficiency in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection, 2021,37(4) :37-43. (in Chinese))
- [15] 邓光耀. 基于污水排放量分配的中国水资源利用效率测算 [J]. 水资源保护, 2019, 35 (5) : 28-34. (DENG Guangyao. Estimation of water use efficiency in China based on sewage discharge distribution [J]. Water Resources Protection,2019,35(5) :28-34. (in Chinese))
- [16] 孙才志,刘玉玉. 基于 DEA-ESDA 的中国水资源利用相对效率的时空格局分析 [J]. 资源科学, 2009, 31 (10) : 1696-1703. (SUN Caizhi, LIU Yuyu. Analysis of the Spatial-temporal pattern of water resources utilization relative efficiency based on DEA-ESDA in China [J]. Resources Science, 2009, 31 (10) : 1696-1703. (in Chinese))
- [17] 赵良仕,刘思佳,孙才志. 黄河流域水-能源-粮食安全系统的耦合协调发展研究 [J]. 水资源保护, 2021, 37 (1) : 69-78. (ZHAO Liangshi, LIU Sijia, SUN Caizhi. Study on coupling and coordinated development of water-energy-food security system in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2021,37(1) :69-78. (in Chinese))
- [18] 左其亭,张志卓,吴滨滨. 基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价 [J]. 水资源保护, 2020, 36 (2) : 1-7. (ZUO Qiting, ZHANG Zhizhuo, WU Binbin. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model [J]. Water Resources Protection, 2020,36(2) :1-7. (in Chinese))
- [19] 孟望生,邵芳琴. 黄河流域环境规制和产业结构对绿色经济增长效率的影响 [J]. 水资源保护, 2020, 36 (6) : 24-30. (MENG Wangsheng, SHAO Fangqin. Influence of environmental regulation and industrial structure on the growth efficiency of green economy in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (6) :24-30. (in Chinese))
- [20] 俞雅乖,刘玲燕. 中国水资源效率的区域差异及影响因素分析 [J]. 经济地理, 2017, 37 (7) : 12-19. (YU Yaguai, LIU Lingyan. Regional differences and influence factors of water resource efficiency in China: based on super efficiency DEA-Tobit [J]. Economic Geography, 2017,37(7) :12-19. (in Chinese))
- [21] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis [J]. European Journal of Operational Research, 2001 ,130(3) :498-509.
- [22] TONE K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis [J]. European Journal of Operational Research, 2002, 143(1) :32-41.

(收稿日期:2021-08-13 编辑:施业)

