

中国城市水资源利用效率的测度及影响因素分析

李佳佳 鲜帛彤¹

(山西大学 经济与管理学院, 山西 太原 030006)

【摘要】 基于 2003—2018 年中国 282 个城市的面板数据, 在测度城市水资源利用效率基础上, 运用空间杜宾模型分析城市水资源利用效率的空间集聚特征及影响因素。结果表明: 在时间分布上我国整体水资源利用效率偏低, 但具有波动上升趋势; 在空间分布上具有东强西弱, 珠江流域优于黄河、长江流域, 大城市优于中小城市的分布特征。就影响因素而言, 经济发展水平和工业化程度与全国水资源利用效率正相关, 且有显著的空间溢出效应, 科教水平、用水状况和环境管制与全国水资源利用效率负相关, 同时, 各因素对不同区域城市水资源利用效率的影响程度不同。因此, 各地区政府应因地制宜, 落实水资源管理, 合理分配生产要素, 优化产业结构, 加强域域协调合作。

【关键词】 水资源利用 时空特征 DEA 模型 空间杜宾模型

【中图分类号】 F062.2; X196 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1671-4407(2022)07-184-08

1 引言及文献回顾

水不仅是人类赖以生存和发展的保障, 也是十分重要的自然资源和区域经济资源。自 20 世纪 80 年代以来, 水资源短缺问题就一直受到各个国家的高度重视。中国水资源总量位于世界第六, 但人均占有量与发达国家之间差距较大, 近 2/3 的城市处于缺水状态, 且时空分布差异明显。同时, 随着我国城镇化不断推进, 社会发展与资源利用之间的矛盾也进一步激化。针对这些问题, 我国政府近年陆续颁布了一系列政策加强对水资源的监管和保护。习近平总书记强调, 保护环境就是保护生产力, 改善环境就是发展生产力, 要按照生态系统内在规律统筹考虑社会各要素, 争取在 2035 年形成绿色发展的生产方式, 使水资源利用效率达到世界先进水平。因此, 研究水资源利用效率及其时空差异, 分析水资源利用效率的影响因素, 对促进水资源合理利用, 进而推动城市可持续发展具有重要的理论与现实意义。

随着资源环境问题日益突出, 国内外很多学者对水资源利用问题进行了研究。就水资源研究对象而言, 主要以单个地区或行业为主。Alsharif 等^[1]对巴勒斯坦的用水效率进行研究分析, 结果表明水损失是水资源利用效率较低的主要原因, 应加强供水系统的基础设施建设。Andrea & Giulia^[2]审查了意大利 43 家自来水公司的年度财务报表, 通过计算成本效率发现公司的所有权结构、运营规模和地理位置对其业绩有不同程度的影响。Sarkis & Cordeiro^[3]利用 DEA 模型确定美国 437 家发电厂的生态和技术效率, 并给出能够使得技术效率和环境绩效同步提高的最优方案。Prakashan 等^[4]着重研究水价对印度克里希纳流域农业生产系统中灌溉用水效率的影响, 发现水价的上涨不会造成利润损失, 但水的需求会大大减少。Mousavi 等^[5]模拟一家制药公司的生产, 基于层次结构框架评估工业生产设备对水资源利用效率的动态影响, 进而探究能源和水效率之间的关系。Seung 等^[6]在测算中亚国家的农业用水效率时充分考虑了农作物类型和灌溉方式。Bi jan 等^[7]探讨了影响伊朗灌溉水管理的 40 个内外部因素, 得出法律、社会、技术和政治是灌溉水管理失效的主要原因, 同时提议应大力发展农业。罗海平和黄晓玲^[8]着重研究我国粮食主产区的

¹**作者简介:** 李佳佳, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 研究方向为经济制度与可持续发展。E-mail:lijiajia1101@sxu.edu.cn
基金项目: 山西省哲学社会科学规划重点课题“山西推进黄河流域生态保护和高质量发展的举措研究”(2020ZD006); 山西省高等学校科技创新项目“区域城市生态效率的空间溢出及驱动机制研究”(2019L0054)

农业用水利用效率,通过构建粮食生产函数得出水资源投入量与粮食产量具有正相关关系。高孟菲等^[9]将方向性距离函数和松弛测度模型结合,利用空间杜宾模型测算出黄河流域 9 个省份绿色水资源效率的变动趋势。李星等^[10]对塔里木河流域水资源适应性利用能力进行量化研究,结果显示系统处于低水平状态但整体趋于稳定协调发展。郭佳航等^[11]以新疆作为研究对象,探究其水资源利用与产业经济之间的关系,结果发现工业用水量与人均 GDP 适配度高。

对于水资源利用测度的方法,学者通常使用数据包络分析法、熵值法、SBM 法等进行测度。Kazuo 等^[12]利用 DEA 模型中一种范围调整的效率度量(RAM)来评估日本供水企业的绩效。Jin-li 等^[13]将劳动就业和资本存量等作为输入指标,通过 DEA 模型测算水调节目标比率(WATR),得出中国中部地区用水效率最低。盖美等^[14]不仅通过 SBM 模型得到辽宁省各市近 15 年的水资源利用绝对效率,而且构建核密度估计模型探索其发展规律,发现各市水资源利用相对效率呈上升趋势,且城市间差距不断缩小。朱达等^[15]基于 CCR 模型综合考虑农业、工业、生活和社会等因素对水资源利用水平的影响,并计算得到城市 CES 得分,结果显示我国大部分城市的 CES 得分较低,像重庆、南昌等水资源充沛的城市得分也低。田贵良等^[16]采用三阶段 DEA 模型和灰色关联分析法探究长江经济带城市水资源利用水平及变化规律,发现各城市水资源利用效率在最严格水资源管理制度颁布后均有不同程度提高。任玉芬等^[17]通过 SBM 法和 Mann-Kendall 检验法计算中国 5 个生态区的水资源利用效率及变化趋势,并针对城市可持续发展给出政策建议。贺玉晓等^[18]结合城市所在的生态地理区域,根据资本、资源和劳动力三个投入指标,基于分类 DEA 法对其时间变化、空间分布以及空间收敛性进行分析。曾惠等^[19]采用熵值法和改进的水足迹计算方法,评价珠江三角洲城市群综合体系,得出城市化发展与水资源利用效率呈现正相关关系,同时,城市用水量增加也会使得水足迹总量增加。

也有部分学者分析了水资源利用的时空分布和影响因素。孙爱军等^[20]通过面板数据模型计算出我国城市用水技术效率,并利用耦合度函数测算其与城市经济发展水平间的协调度,研究发现二者协调度逐年提高。杨胜苏等^[21]利用熵值法测度各个指标对水资源利用效率的影响程度,并结合耦合协调发展模型探究经济发展水平与水资源利用效率之间的关系。尹庆民和朱康宁^[22]利用 EBM 模型和面板 Tobit 模型研究长江经济带的工业用水利用效率及影响因素,研究结果显示 2008—2017 年长江经济带的工业用水效率波动下降,城域间存在显著差异。单子丹等^[23]采用 IPCC 方法对内蒙古碳排放的时空规律进行分析,通过最小二乘回归估计得到发展新兴技术产业是减少碳排放量的关键。赵昀皓等^[24]通过概率性 Budyko 方程测度我国水资源空间分布规律,识别出我国水资源高度脆弱地区,并表明降水是影响水资源含量的主导因素。

综合而言,目前国内外学者在研究水资源利用问题时,主要将研究对象确定在某个地区或某个行业,很少有研究涉及全国市级或县级城市,将城市按照不同标准进行分类,分别研究其水资源利用效率的时空差异,并分析其影响因素的研究更是少之又少。这种通常以单一流域、单一省份或单一城市为研究对象的研究往往不能深入探讨水资源利用过程中具体存在的问题,进而给出针对性建议和改进措施。因此,本文基于超效率 DEA 模型和空间杜宾模型,以中国 2003—2018 年 282 个地级市为研究对象,实证分析了城市水资源利用效率的时空分布及影响因素,为各城市提高水资源利用效率、制定相关政策提供参考借鉴。

2 水资源利用效率的测度及分析

2.1 测度模型

数据包络分析法(DEA)是以相对效率为基础,根据多项投入产出指标计算同类单元相对有效度的数量分析方法。此方法充分考虑了研究对象的信息和特点,能够提出对其本身而言最优的配置方案。由于在测度水资源利用效率时,样本城市均处于技术有效状态而无法区分其利率差异,故本文选择以投入为导向且规模收益保持不变的超效率 DEA 模型,它将有效的决策单元根据效率大小排序,在计算某一个决策单元有效度时,将其在约束条件中去除,进而得到在原模型下有效的最优结果。假设有 n 个独立的决策单元 DMU,每个 DMU 消耗 m 项投入得到 s 项产出, x_{ij} 、 y_{rj} 分别表示第 j 个 DMU 的第 i 项投入和第 r 项产出,则超效率 DEA 模型表达式如下:

$$\begin{aligned}
& \min \left[\theta - \varepsilon \left(\sum_{i=1}^n s_i^- + \sum_{r=1}^s s_r^+ \right) \right] \\
& \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^- = \theta x_{i_0} \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = y_{r_0} \\ \lambda_j \geq 0; s_i^-, s_r^+ \geq 0; j=1, 2, \dots, n; i=1, 2, \dots, m; r=1, 2, \dots, s \end{cases} \quad (1)
\end{aligned}$$

式中： θ 为综合效率评价指数， ε 为无穷小量， s^- 和 s^+ 为松弛变量， λ_j 为 DMU_j 的全变量。

2.2 指标选取

由于水资源系统具有显著的复杂性、广布性和流动性，其利用效率会受到多种内外部因素影响。因此本文参考大量相关文献，在遵循科学性和系统性的基础上，主要从城市扩张、人力资源投入、水资源投入、政府投资等方面入手，选取 8 个具有代表性的指标作为投入指标，具体包括：城市建设用地面积占市区面积的比重、市辖区年末实有城市道路面积、人口密度、年末城镇失业人数、供水总量、居民生活用水量、固定资产投资额、教育事业费支出，并选取地区生产总值作为产出指标。将中国 282 个地级及以上城市作为研究单元，从 2004—2019 年《中国城市统计年鉴》和各省的统计年鉴中获取基础数据。对于个别数据的缺失，采取均值法进行填补。

2.3 测度结果分析

本文采用 MYDEA 软件对各城市的水资源利用效率进行测度，结果显示，2003—2018 年全国水资源利用效率均值为 0.625，其中，中山市的平均水资源利用效率最高，达到 1.945，吴忠市的平均水资源利用效率最低，仅为 0.335。全国水资源利用效率波动发展且有上升趋势，整体涨幅 15.89%，其中 2008 年呈明显下降趋势，2010 年之后波动递增。究其原因，2008 年中国经济遭到全球金融危机重创，同时自然灾害频发，各大流域遭遇严重凌汛，多个省份的水利设施破损，为此政府将财政资金主要用于抗震救灾和基础设施修复，导致资源分配不均，城市水资源利用效率显著下降。2010 年起，国家发布《关于实行最严格水资源管理制度的意见》加快水资源改革进度，加之居民素质提升和全球经济缓慢恢复，水资源利用效率得以逐步提高。

从我国城市水资源利用效率的地理分布图可知(图 1)，从空间分布来看，我国城市水资源利用效率分布不均，且存在明显的区域差异，整体表现出经济发达城市效率较高，经济欠发达城市效率较低的特征。2003 年，城市社会经济发展与水资源利用处于濒临失调的阶段，各城市过于追求经济效益而忽视水资源的适度开发和可持续利用问题，城镇化的持续发展也加大了水资源消耗量和废水排放量，造成全国城市水资源利用效率普遍较低。2010 年，随着相关水资源管理制度的颁布实施，城市水资源利用效率有所提升，社会经济发展与水资源利用之间的关系得到缓和。其中：东莞市作为珠江三角洲东岸中心城市，经济发展水平较高，人力财力、技术设备等投入较大，非期望产出尤其是废水排放量较少，因此水资源利用效率相对较高；武威市作为资源型城市，水资源投入总量较少，而产生的经济效益相对较大，因而水资源利用效率也相对较高。2018 年，全国城市水资源利用效率的空间分布格局与 2010 年大体一致，但整体效率明显上升，大多数城市已达到社会经济与水资源利用相互促进、协调发展的阶段。同时，高效率城市呈带状分布特征，主要集中分布在东部沿海、黄河中下游和长江中下游地区，形成多个绿色发展城市群。这些城市地处平原且邻近水源，具有得天独厚的地理条件，加之经济发达、交通便利、政策开放，产生显著的人才资金集聚效应。

2.3.1 不同区域水资源利用效率的差异分析

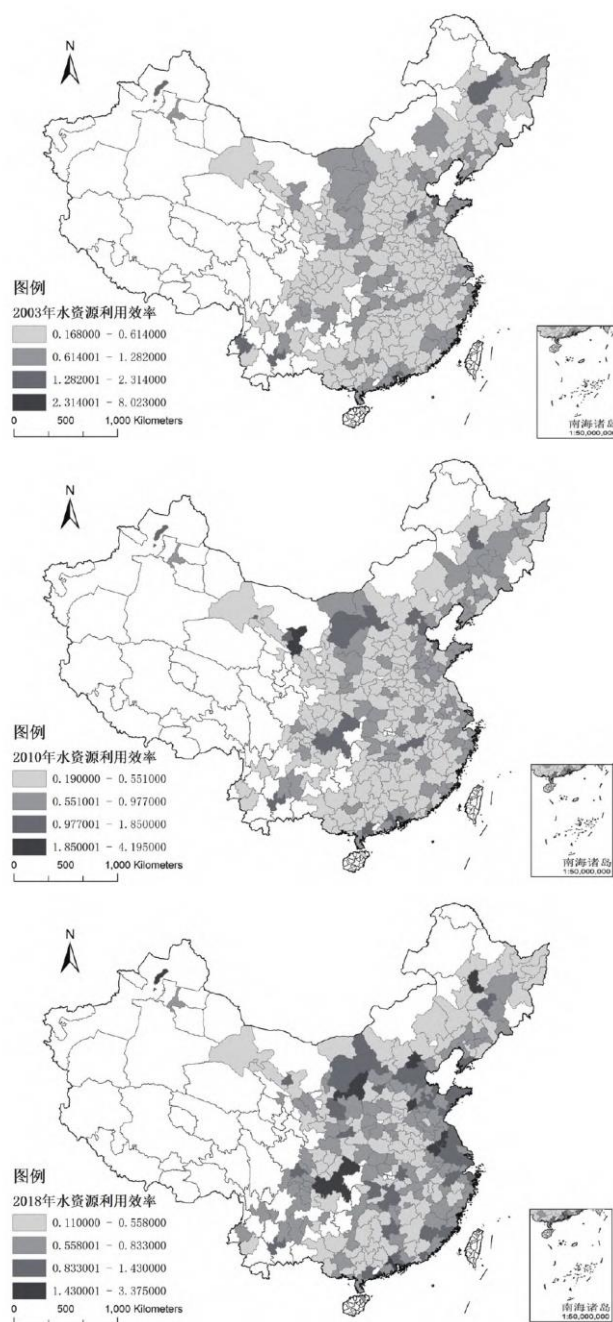


图 1 全国城市水资源利用效率空间分布

注：底图基于自然资源部监制标准中国地图制作，审图号 GS(2020)4632 号。

根据行政区域地理位置将 282 个城市划分为东部、中部、西部三个地区(图 2)，其中，东部地区城市水资源利用效率(0.675)明显高于中部地区(0.570)和西部地区(0.627)。具体来看，东部地区临近海洋，水含量丰富，且城市结构完善，经济发展已达较高水平，政府和企业能够投入相对更多的资金用于水资源管理，使资本和劳动力配置最优化，同时科学技术聚集式发展，充分利用技术人才优势不断革新节水技术，实现水资源利用的高效性和可持续性，这也正是联合国可持续发展计划的目标之一。中部地区工业化进程加快，但河流稀缺，降水量少，水资源供需矛盾十分突出，因此，该地区城市还需进一步合理分配生产要素，优化

产能结构。西部地区虽然水资源利用效率偏低，但增速高达 23.13%。可能的原因是：西部地区地广人稀，作为中国两大河流的起源地，人均占水量高，另外国家一直在积极开展大学生志愿服务西部计划、援疆计划、脱贫攻坚等项目，众多人才引进至此，带来科学与先进技术，不仅丰富了当地居民的节水知识，而且对水资源系统的建设与管理提供帮助。同时，当地城市虽然经济水平较低但发展潜力巨大，增加等量投入可以获得更多的边际报酬，各方面发展处于高速增长阶段。比如，榆林市作为资源型城市，依靠转型发展减少水资源损耗，以 368.10% 的增速居于全国首位。

2.3.2 不同流域水资源利用效率的差异分析

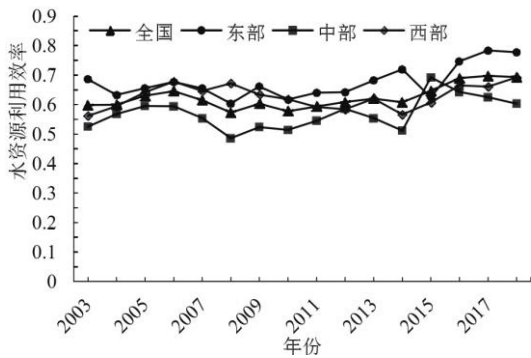


图 2 全国及不同区域城市水资源利用效率趋势

我国河流湖泊星罗广布，众多河流蕴藏着大量的自然资源，有利于当地生态与经济发展。本文对我国三大流域(黄河流域、长江流域、珠江流域)内主要城市进行比较研究(图 3)。黄河流域横跨山西、内蒙古、河南、甘肃等多个省级行政区，此部分选取该流域内 31 个城市作为研究对象，其在研究时段内水资源利用效率均值为 0.636，基本与全国整体水平同步。这充分表明，虽然长期的过度开发利用使黄河流域一直面临着水土流失、水环境污染、自然灾害频发等严峻的生态问题，但近年来基于习近平总书记着重强调加强对黄河流域水资源的节约集约利用，各级政府调整相关政策，改善水资源环境，使其发展步入新常态。长江作为世界第三大河，流域覆盖面积大，流经城市众多，此部分主要研究该流域内 79 个城市，其在研究时段内水资源利用效率呈波动上升趋势，但总体来说效率较低，仅为 0.578。究其原因，一是该流域内城市经济发展与生态资源利用的协同演化濒临失调，水环境承载力明显下降；二是该流域内充沛的水资源致使相关技术革新需求降低，废水污水排放未达标准，污染环境的同时也不利于水资源系统的维护；三是该流域内城市发展以农业生产为主，而农业用水浪费现象普遍存在，当地水资源含量已无法满足生产生活的用水需求。珠江流域包含以发达城市为主的 29 个样本城市，这些城市已实现绿色生产方式，低水耗产业占比高，科研机构与高新人才占有量大，对水资源的开发利用程度高，故在研究时段内水资源利用效率均值较高，为 0.793。特别的，2014 年是我国全面深化改革第一年，深圳市和珠海市作为经济特区带头示范，充分发挥市场决定性作用，配置结构合理优化，水资源利用效率显著提升。

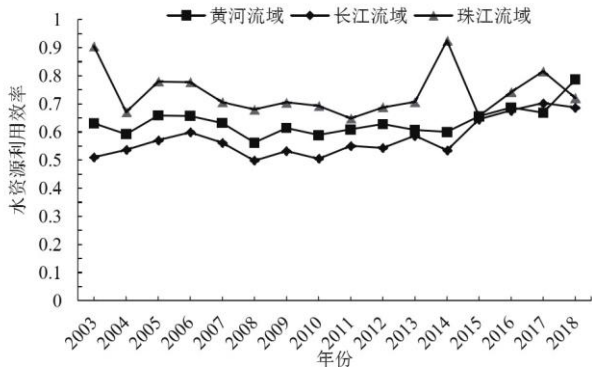


图 3 不同流域城市水资源利用效率趋势

2.3.3 不同规模水资源利用效率的差异分析

以 2018 年各城区常住人口为统计口径, 根据国务院最新城市规模划分标准, 结合本文需要将 282 个城市划分为大城市、中等城市和小城市, 分别包含 82、96、104 个城市。三类城市在研究时段内水资源利用效率趋势如图 4 所示, 从图中可知, 城市规模越大, 水资源利用效率越高, 二者大体成正相关关系。特别的, 2015 年 3 月起国内股市遇冷, 城市经济受到严重负面影响, 尤其是以金融业为主的大城市, 其从业人员众多, 经济波动所引起效果更加明显。同时金融反腐大力开展, 政府着重整顿金融行业, 减少了对生态系统的投入资金, 水资源利用效率骤减。根据水资源利用效率将所有城市划分为四个等级水平: 超高效(>1.0)、高效(0.6~1.0)、低效(0.2~0.6)、超低效(0~0.2)。经统计, 2003 年, 大城市中共有 12 个超高效城市, 这些城市多为省会或经济中心城市, 其集约程度高, 具有科技创新支持效应与绿色产业集聚效应, 综合推动水资源利用水平。小城市中绥化市、怀化市、来宾市、玉溪市、保山市和克拉玛依市由于水资源充沛且生态环境良好, 同样具有超高水资源利用效率。全国仅有梅州市和清远市处于超低效率水平。2018 年, 由于供给侧结构性改革和人才战略不断推进, 全国超高效城市增加至 34 个, 梅州市和清远市的水资源利用水平也逐步上升为低效, 但遵义市近年来承接大量高耗水企业, 工业“三废”未经净化处理, 地下水水质污染严重, 以 0.11 的效率值成为全国唯一超低效城市。

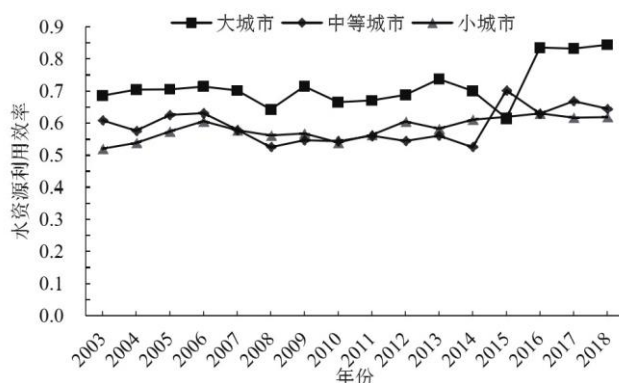


图 4 不同规模城市水资源利用效率趋势

3 水资源利用效率的影响因素分析

3.1 实证模型

3.1.1 空间相关性检验

空间自相关用于检验样本之间可能存在的空间依赖现象, 以判断其是否适用于空间计量模型。全局空间自相关性是从整体上描述所有单元与周边单元的空间相关性。全局 Moran' sI 指数计算公式为:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

式中：n 为空间单元个数， y_i 为空间单元属性值， $\bar{y}$ 为空间单元属性均值， W_{ij} 为二进制的空间相邻权值矩阵中元素，采用地理距离标准。

局部空间自相关性可观测到每一个空间单元与其周边单元的空间关联程度，进而判断出具体哪些空间单元形成聚集群。局部 Moran' sI 指数计算公式为：

$$I_i = (y_i - \bar{y}) \sum_{j \neq i}^n W_{ij} (y_j - \bar{y}) \quad (3)$$

式中： I_i 表示第 i 个空间单元的属性值， I_i 的正负反映了该空间单元属性值与整个空间平均值之间的高低情况，及与其周边单元之间的高低情况。故由此将所有空间单元划分为四种类型，分别是高一高 (H-H) 聚类、低一高 (L-H) 聚类、低一低 (L-L) 聚类和高一低 (H-L) 聚类。

3.1.2 实证模型

空间计量模型主要用于研究空间相关性和差异性问题。其中，普通最小二乘估计法 (OLS)、空间滞后模型 (SAR)、空间误差模型 (SEM) 与空间杜宾模型 (SDM) 是基本的计量模型。普通最小二乘估计法 (OLS) 形式为：

$$y_{it} = \beta x_{it} + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

空间滞后模型 (SAR) 主要研究区域间被解释变量的相互影响，形式为：

$$y_{it} = \rho W_{ij} y_{it} + \beta x_{it} + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

空间误差模型 (SEM) 主要研究区域间解释变量的相互影响，形式为：

$$\begin{aligned} y_{it} &= \beta x_{it} + \mu_{it} \\ \mu_{it} &= \lambda W_{ij} \mu_{it} + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (6)$$

空间杜宾模型 (SDM) 将以上模型优势结合，能够同时考虑周边地区的解释与被解释变量对研究地区的影响，形式为：

$$y_{it} = \rho W_{ij} y_{it} + \gamma z_{it} + \eta W_{ij} z_{it} + \varepsilon_{it} \quad (7)$$

式 (4)~式 (7) 中： x 为解释变量， y 为水资源利用效率， z 为影响水资源利用效率的影响因素， i 为个体编号， t 为时间。 β 为解释变量系数， λ 为自回归系数， μ 为随机误差向量， γ 为控制变量系数， ρ 和 η 为相应变量的空间滞后系数， ε 为随机

误差项。 W_{ij} 为地理空间权重矩阵：
$$W_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{d_{ij}^2} & i \neq j \\ 0 & i = j \end{cases}$$
 d_{ij} 为两个城市之间的地理距离。

3.1.3 指标选取

为进一步研究城市与其周边城市的关联程度,进而探讨城市水资源利用效率的影响因素,本文通过构建空间计量模型,以水资源利用效率作为被解释变量,从经济发展、产业结构、科技创新、用水状况和环境管制五个方面来分析水资源利用效率的影响因素。其中,经济发展水平(PGDP)采用人均GDP衡量,工业化程度(IS)用第二产业从业人员比重表示,科技教育水平(SE)用科技教育支出占财政支出的比重来表示,用水状况(PWC)采用人均家庭生活用水量,从侧面反映居民的用水情况,政府环境管制强度(ER)用生活污水处理率来表示。

3.2 实证结果分析

3.2.1 空间自相关检验

本文通过 Moran' sI 指数来判断变量之间是否存在空间自相关(图 5)。从宏观层面看,全局 Moran' sI 指数持续上下波动,各城市间的空间关联程度极不稳定。从微观层面看,我国城市水资源利用效率的全局 Moran' sI 指数 2003—2018 年均大于 0.02,且 P 值均小于 0.05,表明城市间水资源利用效率存在显著空间正相关,即水资源利用效率较高的城市趋向于周边水资源利用效率同样较高的城市,反之,水资源利用效率较低的城市趋向于周边水资源利用效率同样较低的城市。

从 2003 年和 2018 年的局部 Moran' sI 散点图(图 6、图 7)可知,2003—2018 年各聚集区内所含城市变化较大,且整体重心向第 I 象限偏移,说明各城市力争脱离低效聚集区,水资源利用效率持续提高,城市间水资源利用效率呈显著正相关性且逐年增强。具体来看,2003 年大部分城市集中分布在第 I 象限和第 II 象限。特别是在 H-H 聚集区内,广东省各市由于具有临海地理优势、夯实的基础经济和众多高等学府,其水资源利用效率均很高,平均值达到 0.87,且水资源利用效率高的城市对周边城市群产生正向辐射作用。2018 年局部 Moran' sI 指数整体提高,城市集中分布在第 I 象限,说明城市水资源利用效率及其对周边城市群的带动作用显著增强,形成优势发展城市聚集区。但黑龙江省各市仍处于 L-L 聚集区,且水资源利用效率有所降低,落后全国平均水平较多。黑龙江省地处中温带,降水量少,且位于中国最北部,交通可达性低,社会发展滞后,引发大量非期望产出,因而水资源利用效率低,并对领域城市产生拖累效应。

3.2.2 水资源利用效率的影响因素分析

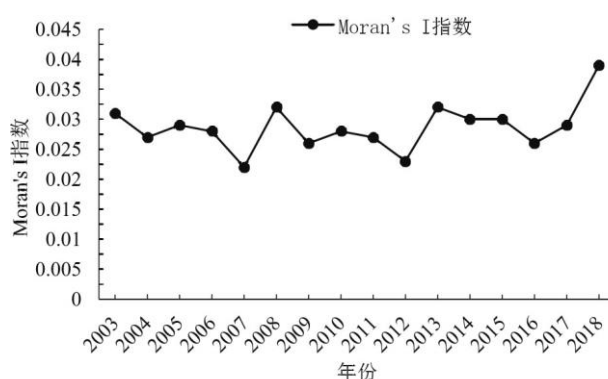


图 5 2003—2018 年全球空间自相关指数

根据 Hausman 检验结果可知固定效应模型较随机效应模型效果更好。通过 Wald 检验可知 SDM 模型最好。依次通过三种固定效应模型进行回归分析,比较极大似然值,结果显示双固定效应(即个体和时间均固定)SDM 模型的极大似然值最大,效果最好,

故本文研究均选择双固定效应 SDM 模型进行分析。

就全国而言，(1)经济发展水平的提升对提高城市水资源利用效率具有基础性促进作用，且空间溢出效应显著。城市经济快速发展给水资源的开发利用带来资金和技术支持，核心节水技术广泛应用，极大增强了水污染防治能力，减轻水资源消耗带来的负面影响，对周边地区起带动作用，有利于整体水资源利用水平提升。(2)工业化程度的回归系数显著为正，空间滞后项系数显著为负，意味着城市工业化程度越强，水资源利用效率越高，但对周边城市的水资源利用效率提高发挥显著抑制作用。究其原因，产业同构导致城市间生产要素配置效率难以提高，同时，结构优化致使当地高耗能产业向周边城市转移，阻碍其他城市水资源系统的绿色发展，区域资源配置失衡，从而产生负向空间溢出效应。(3)科技教育水平的回归系数为负，说明科技教育的进步会抑制水资源利用效率提高。理论上，政府可以通过支持科技创新和培养高素质人才进行技术革新，来减少污水排放和净化水环境，但在实际中，仅增加科技教育支出占财政支出的比重，单纯地依靠地方企业和个人的资金投入，忽视技术人才的产出效率并不能真正提升水资源利用效率。(4)用水状况与水资源利用效率呈负相关，且存在正向溢出效应。这可能是因为我国大部分城市仍然处于粗放式用水状态，用水结构缺乏合理性，农业用水和工业用水浪费现象严重，对污水废水处理不到位。居民节水知识欠缺，节水素质低下，在日常生活中缺乏节水意识。(5)政府环境管制强度对水资源利用效率具有抑制作用，且空间滞后项在 1% 的水平上显著为负，表明政府环境管制形成跨区域扩散效应。由于环境系统的不稳定性和政策执行的时效性，污水处理效果欠佳或产生额外成本，尤其对水价的制定，大多数城市实施单一定价，缺少对当地实际水资源含量和人力物力资本的考虑。同时，不同城市的政策执行能力存在偏差，区域间缺乏协调性。

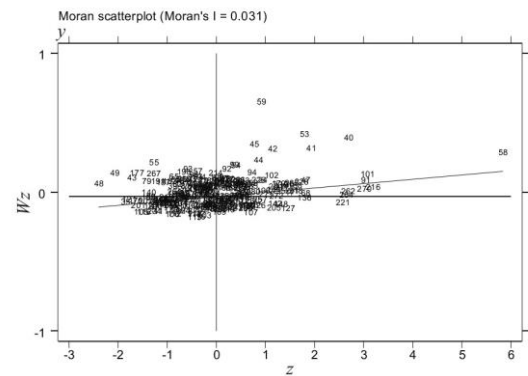


图 6 2003 年城市水资源利用效率散点图

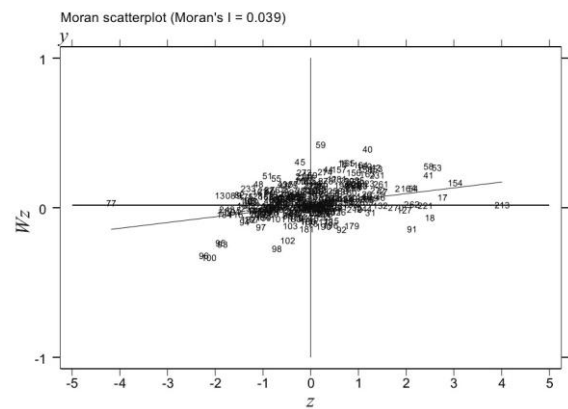


图 7 2018 年城市水资源利用效率散点图

3.2.3 水资源利用效率影响因素的异质性分析

为了分析水资源利用效率影响因素的异质性,本文对不同区域、不同流域和不同城市规模进行了实证分析。对于不同区域城市而言,东部和中部地区工业水平快速提升,但并不利于水资源可持续利用与发展,故工业化程度的回归系数为正。而西部地区由于生态环境脆弱,石漠化程度逐年加快,密集型工厂加剧水污染,使水资源利用效率下降,故其回归系数为负。西部地区内部由于行政区划壁垒和信息交流闭塞,五个影响因素的空间滞后项系数均为正,表现出显著空间溢出效应,某一城市的环境改变势必影响周边城市。

对于不同流域城市而言,经济发展水平对黄河流域的影响最大,且具有一定的正向溢出效应。此流域内区域合作紧密频繁,集聚效果明显,城市间能够有效带动彼此经济发展,水资源利用效率得以显著提升。对于长江流域来说,政府环境管制强度与水资源利用效率呈正相关关系,且空间滞后项系数为正。这充分说明当地政府影响力大,执行力强,不断加强水污染防治与保护力度,水资源质量逐步提高;同时由于竞争意识,城市之间互相学习效仿,当某城市水资源利用效率由于政府加强环境管制提高时,周边城市便会主动效仿,向高效率城市靠拢。珠江流域内城市发展大多以第一、三产业为主,提高工业化并不能相应提高水资源利用效率。为此应继续优化珠江地区产业内部结构,责令整改高耗水企业,同时退耕还林,加强生态保护。

对于不同规模城市而言,科技教育水平在大中城市内正向空间溢出效果明显,这些城市公共基础设施完善,充分发挥城域间交通、信息及资源优势,积极开展人才引进政策和高等教育区域合作,优化配置科技教育资源,节水技术与知识得以充分交流。而小城市由于社会服务水平低,空间扩散能力较弱,未形成教育长效机制,水环境无法协同治理,因此应加强政府引导作用,实现智能驱动的资源优化配置。

4 结论与政策建议

4.1 结论

本文基于2003—2018年中国282个城市的平衡面板数据,通过超效率DEA模型和空间杜宾模型在测度水资源利用效率基础上,对其时空演变、空间集聚特征及影响因素进行了分析。结果表明:(1)从时间维度来看,2003—2018年中国城市水资源利用效率整体偏低,大部分城市尚未实现投入产出最优,2010年起水资源利用效率波动上升。(2)从空间维度来看,我国城市水资源利用效率呈现东强西弱的分布格局,且不同区域间水资源利用效率差异性大,珠江流域优于黄河、长江流域,大城市优于中小城市。(3)中国城市整体的水资源利用效率时空演变格局呈现出明显的H-H聚集状态,城域间差异不断缩小。(4)经济发展水平和工业化程度与全国整体水资源利用效率正相关,其他因素则产生抑制效果,且各影响因素对城市水资源利用效率存在空间分层异质性影响。

4.2 政策建议

(1) 牢记绿色发展理念,落实水资源管理制度。

各级政府应加强对水资源合理开发与高效利用的重视程度,加大资金和技术支持,严格监控水污染源头治理工作,提高水源质量。加快雨水资源化,增强水资源调蓄能力,建设水生态文明城市,有序布局绿色产业城市群。全面推进节水型社会建设,加强宣传工作,在全国范围内普及节水知识与技术,提高居民用水素质,倡导科学用水,减少生活用水的浪费与污染。

(2) 以水而定,协同发展。

统筹城市实际水资源禀赋与经济发展状况,在水资源承载范围内制定相适配的政策方针,完善兼顾水环境成本的用水定价

机制，为城镇化的快速发展提供水资源保障。积极响应水利工程建设，推动城域间对口合作，缩小发展差距，东部地区城市带动中西部城市发展，主动分享治理经验，对话协商，协同共进。加快长江流域内产业转型升级，兼顾社会效益与生态环境效益，借助经济优势提高节水技术创新能力，重点发展低耗能的可持续性产业。建立激励机制，加强资源整合优化，适当推动小城市城镇化发展。

(3)推动经济发展，优化产业结构。

因地制宜调整经济发展方式，政府与市场协同发力，进一步配置生产要素组合，优先发展服务行业。推动节水技术集聚式发展，淘汰高耗水企业，实现低入高出的生产方式。确保科技创新与政府管制应用于实际，动态管理，定期排查，合理制定奖惩措施，对在节水技术研发等方面有突出贡献的集体或个人给予资金奖励，同时，严厉打击污染水源等行为，切实提高我国整体水资源利用水平。

参考文献:

[1]Alsharif K,Feroz E H,Klemer A,et al.Governance of water supply systems in the Palestinian territories:A data envelopment analysis approach to the management of water resources[J].Journal of Environmental Management, 008, 7(1):80-94.

[2]Andrea G,Giulia R.Measuring and comparing the efficiency of water utility companies:A data envelopment analysis approach[J].Utilities Policy, 2011, 19(3):202-209.

[3]Sarkis J,Cordeiro J J.Ecological modernization in the electrical utility industry:An application of a bads-goods DEA model of ecological and technical efficiency[J].European Journal of Operational Research, 2012, 19(2):386-395.

[4]Prakashan C V,Stijn S,Guido H.Estimating the impact of water pricing on water use efficiency in semi-arid cropping system:An application of probabilistically constrained nonparametric efficiency analysis[J].Water Resources Management, 2013, 27(1):55-73.

[5]Mousavi S,Kara S,Kornfeld B.A hierarchical framework for concurrent assessment of energy and water efficiency in manufacturing systems[J].Journal of Cleaner Production, 2016, 133:88-98.

[6]Seung O, Lee, Younghun J.Efficiency of water use and its implications for a water-food nexus in the Aral Sea Basin[J].Agricultural Water Management, 2018, 207(30):80-90.

[7]Bijan N,Abdolmajid L,Mohammad R A,et al.Irrigation water management in Iran:Implications for water use efficiency improvement[J].Agricultural Water Management, 2018(30), 208:7-18.

[8]罗海平，黄晓玲.我国粮食主产区粮食生产中的水资源利用及影响研究[J].农业经济，2020(2)：3-5.

[9]高孟菲，于浩，郑晶.黄河流域绿色水资源效率及空间驱动因素研究[J].生态经济，2020(7)：44-50.

[10]李星，左其亭，韩淑颖，等.塔里木河流域水资源适应性利用能力评价及调控[J].水资源保护，2021(2)：63-68.

-
- [11]郭佳航,左其亭,李东林,等.新疆水资源利用与产业发展关联研究[J].水资源保护,2021(2):34-42.
- [12]Kazuo A,William W C,Jésus T P,et al.Evaluating water supply services in Japan with RAM:A range-adjusted measure of inefficiency[J].Omega,1998,26(2):207-232.
- [13]Jin-li H,Shih-chuan W,Fang-yu Y.Total-factor water efficiency of regions in China[J].Resources Policy,2007,31(4):217-230.
- [14]盖美,吴慧歌,曲本亮.新一轮东北振兴背景下的辽宁省水资源利用效率及其空间关联格局研究[J].资源科学,2016(7):1336-1349.
- [15]朱达,唐亮,谢启伟,等.基于数据包络分析方法的都市水资源利用效率研究[J].生态学报,2020(6):1956-1966.
- [16]田贵良,盛雨,吴继云,等.最严格水资源管理制度对长江经济带水资源利用效率的影响研究[J].南京工业大学学报(社会科学版),2020(5):90-103.
- [17]任玉芬,方文颖,王雅晴,等.我国城市水资源利用效率分析[J].环境科学学报,2020(4):1507-1516.
- [18]贺玉晓,苏小婉,任玉芬,等.中国生态地理区城市水资源利用效率时空分异特征[J].生态学报,2020(20):7464-7478.
- [19]曾惠,鄢春华,黄婉彬,等.城市化水平与水资源利用效率的关系研究——以珠江三角洲城市群为例[J].北京大学学报(自然科学版),2020(3):561-570.
- [20]孙爱军,董增川,张小艳.中国城市经济与用水技术效率耦合协调度研究[J].资源科学,2008(3):446-453.
- [21]杨胜苏,张利国,喻玲,等.湖南省社会经济与水资源利用协调发展演化[J].经济地理,2020(11):86-94.
- [22]尹庆民,朱康宁.基于EBM模型的长江经济带工业用水效率时空差异及影响因素分析[J].中国环境管理,2020(6):103-109.
- [23]单子丹,项朝霞,李云竹.低碳经济视角下区域碳排放时空差异与驱动因素分析——基于内蒙古自治区101个县域截面数据的空间计量研究[J].科技与管理,2020(2):1-8.
- [24]赵昀皓,邢万秋,傅健宇.基于概率性Budyko方程的我国可利用水资源量脆弱性评估[J].水资源保护,2020(2):47-52.