

基于网络 DEA 的中国省域水资源 效率特征与影响因素分析

石天戈^{1,2} 时卉³¹

(1. 新疆财经大学 经济学院, 新疆 乌鲁木齐 830012;

2. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011;

3. 新疆财经大学 旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830012)

【摘要】: 选取含有非期望产出的 SBM 网络 DEA 模型, 测度我国 2004—2018 年各省份水资源综合效率, 并分解为生产效率和治理效率, 运用面板回归模型分析了水资源效率的影响因素。论文研究发现: 我国水资源生产效率高于治理效率, 治理效率是影响综合效率的主要因素。时间上效率变化以 2012 年为拐点呈“U”型变化趋势, 空间特征东中西差异显著, 南北差异不显著。经济发展水平、产业结构、用水结构是效率变化的主要影响因素, 产业结构因子作用具有空间差异性。影响生产效率的关键因子为二产比重, 影响治理效率的关键因子为用水结构、水资源禀赋和空间集聚。未来应发挥技术水平和跨区域合作在提升治理效率方面的优势。

【关键词】: 水资源 生产效率 治理效率 网络 DEA 时空演变

【中图分类号】: F062.2; X196 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2022)07-176-08

水资源作为生态环境的基础要素之一, 是经济增长和社会发展的关键资源, 也是实现可持续发展的重要物质保障。随着我国加快构建国内国际双循环的发展格局, 践行新发展理念, 社会经济发展需求与水资源、水环境承载力不足的矛盾日益突出。一方面, 在人均水资源不足全世界四分之一的国情下, 用水总量仍在增加, 由 2004 年的 5547.8 亿立方米增加到 2019 年的 6021.2 亿立方米; 另一方面, 水资源污染与水环境情况依旧严峻。2019 年, 全国地表水监测的 1931 个水质断面(点位)中, 仍有 25.1% 的断面为 IV~劣 V 类水质, 全国 10168 个国家级地下水水质监测点中, I~III 类水质仅占 14.4%, 地表水中化学需氧量、总磷、高锰酸盐, 地下水中锰、总硬度、碘化物、氨氮和氯化物仍是主要超标污染物。水环境不达标加剧清洁水资源供应短缺, 水资源高效可持续利用和居民生活水平提高均受到限制。我国水资源时空分布不均, 各省份由于资源禀赋、经济发展程度不同, 水资源开发和利用存在区域差异, 提升全国整体效率并缩小各地区水资源利用效率差异, 成为我国水资源研究的重要问题之一。这对在水

作者简介: 石天戈, 博士, 副教授, 研究方向为城市地理、区域发展。E-mail: stg@xjufe.edu.cn; 时卉, 博士, 副教授, 研究方向为生态环境遥感监测。E-mail: shihui_129@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目“多民族聚居城市学区绅士化时空演变特征及社会融合效应研究——以乌鲁木齐市为例”(41661039); 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目“博格达自然遗产地保护管理规制下哈萨克牧民空间生产研究”(2019D1A96); 新疆财经大学校级科研基金项目“新疆自然遗产地生态保护与社区绿色协同发展机制及路径研究”(2022XGC026)

资源双控管理和污染治理格局下更加合理分配水资源意义重大。

DEA 模型因其“黑箱”原理，有无须事先确定函数关系、非主观赋权等诸多优点，是评价多投入多产出决策单元效率的有效方法，成为评价水资源利用系统相对效率的重要技术工具^[1]。DEA 的基本模型为 C²R 和 BC² 模型，孙才志和刘玉玉^[2]、马海良等^[3]学者用其分析了我国省域水资源的效率，发现 21 世纪初我国水资源效率总体增长，东西部差异明显，有空间自相关特征。在规模报酬可变情况下将综合效率分解为纯技术效率和规模效率，技术效率更能提升水资源效率水平。为解决测算评价单元时间序列效率，Malmquist 指数被用于改进 DEA 模型^[4]，学者发现西部省份在水资源效率拉升的同时生产效率有所下降。为解决测度环境污染的非期望产出，Tone^[5]提出基于 SBM 的非期望产出 DEA 模型，对我国省域尺度^[6]和地级市尺度^[7]的水资源效率和时空相关性测算结果显示，考虑非期望产出后我国水资源效率相对下降，仍呈现东西部差异。影响因素方面，赵良仕等^[8]从空间角度认为人均水资源量、对外开放、经济发展水平等对中国水资源空间差异产生影响，但影响机制还需要深入研究。俞雅乖和刘玲燕^[9]采用 Tobit 回归模型认为经济发展、产业结构技术水平以及环境规制对水资源效率具有正向影响，田贵良等^[10]研究水权交易市场改革也有利于水资源效率提升。对 DEA 模型测算精度改进有两种思路，一种是针对投入产出冗余的纠偏技术被用于 DEA 模型，其中 Tobit 三阶段法^[10]和 Bootstrap 法^[11]被广泛应用于降低外部环境和随机误差的影响；另一种思路是构建新的模型体系，解决效率测度精度问题，如优中选优的超效率 DEA^[9,12]、相近比较的分类 DEA^[13]、固定产出优化分配排放配额的零和收益 DEA^[14]、同时包含径向和非径向距离的 EBM-DEA^[15]、分子系统的网络 DEA^[8]等新模型被用于资源环境效率的测度。

网络 DEA 因其能将黑箱系统按照生产流程细分阶段，更加准确描述系统的内部结构与相互关系，在区域创新^[16]、区域生态效率^[17]、资源环境投入产出效率^[18]等方面取得大量成果应用。模型可以将水资源利用系统分解成生产阶段和治理阶段，深入刻画水资源效率的变化特征，反映政府治理水污染效能，是解决中国水资源效率的关键。该模型已被用于研究工业水系统效率的测度^[17,19]，在全国水资源效率研究中有初步应用。综上所述，理论界对水资源效率测度和影响因素的研究正向纵深发展，研究成果对制定水资源政策和科学合理使用具有重要参考价值，虽然学者们对水资源研究越来越关注，但相关因素的影响并非以线性单调呈现，始终处在变化之中。2012 年以后，国家提出扭转环境恶化趋势的目标要求，水资源效率变化是否产生新特征？水资源影响要素作用是否出现新机制？不同区域是否出现分化？本文在前人研究基础之上，采用网络 DEA 模型，深入测度我国省域水资源的效率特征，并对比不同阶段影响机制说明党的十八大以来水资源效率新特征。

1 研究方法与设计

1.1 网络 DEA 模型

本文采用含有非期望产出的两阶段网络 DEA 模型，对全国各省份水资源效率进行测算，具体模型结构如图 1 所示。

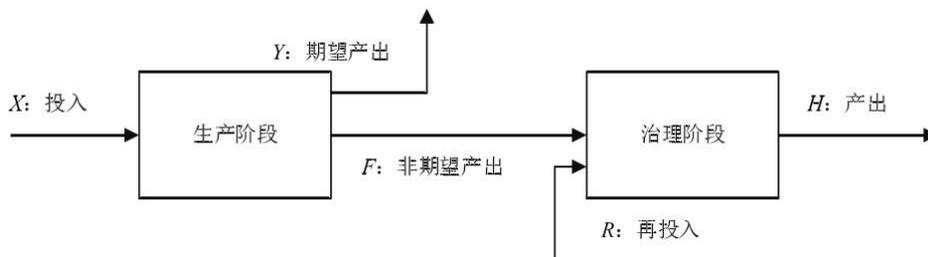


图 1 水资源效率网络 DEA 模型结构图

其中，生产阶段的非期望产出变量，也是治理阶段的投入变量。具体数学模型如下。设 DUM_i^k 第 k 个节点第 i 个决策单元，

节点 k 与其后向联系节点 f 之间的连接项为 $z^{(k,f)}$, $z^{(k,f)}$ 既是节点 k 的产出指标, 也是节点 f 的投入指标, 除连接项之外, x^k 为节点 k 的投入指标, y^k 为节点 k 的期望产出, b^k 为节点 k 的非期望产出, 其中 M^k 、 N^k 、 H^k 为第 k 个网络节点中除连接项之中投入产出的数量, 根据 Tone^[5] 的 SBM 模型基本原理, 评价单元的整体生产效率 τ_0^k 由线性规划式 (1) 求解:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau_0^k} = \max \sum_{k=1}^K W^k & \left[1 + \frac{1}{N_k + H_k + L(k,f)} \right. \\ & \left. \left(\sum_{n=1}^{N_k} \frac{s_n^{k+}}{y_{n0}^k} + \sum_{h=1}^{N_k} \frac{v_h^{k-}}{b_{h0}^k} + \sum_{l=0}^{l(k,f)} \frac{s_l^{(k,f)+}}{z_{l0}^{(k,f)}} \right) \right] \\ \text{s.t.} \sum_{i=1}^I \lambda_i^k y_{ni}^k & = y_{n0}^k + s_{n0}^{k+}, n=1, 2, \dots, k \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^I \lambda_i^k b_{hi}^k & = y_{n0}^k - v_{n0}^{k-}, n=1, 2, \dots, H \\ \sum_{i=1}^I \lambda_i^k z_{li}^{(k,f)} & = z_{n0}^{(k,f)} - s_{n0}^{(k,f)+}, n=1, 2, \dots, L \\ \sum_{i=1}^I \lambda_i^k z_{li}^{(k,f)} & = \sum_{i=1}^I \lambda_i^f z_{li}^{(k,f)}, n=1, 2, \dots, L \\ \sum_{i=1}^I \lambda_i^k z_{li}^{(k,f)} & \leq x_{m0}^k, n=1, 2, \dots, M \\ \sum_{i=1}^I \lambda_i^k & = 1, s_{mi}^{k+} \geq 0, v_{hi}^{k-} \geq 0, s_{li}^{(k,f)+} \geq 0, \lambda_i^k \geq 0, k=1, 2, \dots, K \end{aligned} \quad (1)$$

式中: W^k 为节点的权重向量, $\sum_{k=1}^K W^k = 1$, 由于本文的分析包括水资源的生产阶段和治理阶段两个阶段, 网络节点数量 $k=2$, 设两个阶段的权重相等, 则 $w^1=w^2=0.5$ 。评价单元 DMU_0 在网络节点的效率值 τ_0^k 如式 (2) 所示:

$$\frac{1}{\tau_0^k} = 1 + \frac{1}{N_k + H_k + L(k,f)} \left(\sum_{n=1}^{N_k} \frac{s_n^{k++}}{y_{n0}^k} + \sum_{h=1}^{N_k} \frac{v_h^{k--}}{b_{h0}^k} + \sum_{l=0}^{l(k,f)} \frac{s_l^{(k,f)++}}{z_{l0}^{(k,f)}} \right) \quad (2)$$

式中: s_n^{k++} 、 s_n^{k--} 、 $s_l^{(k,f)++}$ 为式 (1) 中求解的最优松弛变量。

同时, 使用仅含有非期望产出的单阶段 SBM-DEA 模型单独计算第一阶段效率, 与网络 DEA 模型进行比较。

1.2 指标体系构建

水资源使用中面临严重的资源环境问题, 从可持续发展角度, 投入产出效率越来越重视如何促进经济和资源环境可持续发展。生产阶段, 基于经典 CD 函数原理, 水资源使用、资本、劳动等作为投入要素, 经济产出作为期望产出, 污水排放作为非期望产出。治理阶段, 选择污水治理相关指标作为投入, 污水处理量和达标量作为产出变量。DEA 方法指标选取的一般性规则为总指标数 $\leq 1/3$ 决策单元个数。全国除港澳台外, 有 31 个省级行政单元, 因此总指标不超过 10 个。

水资源利用效率受众多因素影响，参考已有研究^[8,9,17,20]，并基于数据的可得性，最终选择空间集聚、经济发展水平、产业结构、技术进步、对外开放、用水结构和资源禀赋七个方面的影响因素：

(1)空间集聚。水资源效率的规模因素在模型指标选取时已经考虑，这里说明空间集聚对效率的影响。空间集聚产生集聚经济，降低成本提高效率。本文选用人口密度反映区域的空间集聚水平。(2)经济发展水平。环境库兹涅茨曲线(EKC)指出环境质量随经济发展呈现先降后升的“U”型曲线关系。国内多数学者均验证生态环境、资源效率与经济发展水平之间的关系^[21]，省际间的经济水平差异是导致水资源投入产出效率的根本原因之一，因此采用人均GDP反映经济发展水平进入模型。(3)产业结构。不同的产业结构决定了水资源利用效率的高低，三次产业间经济收益差异是影响水资源效率差异的主要原因。为区分不同产业的影响，分别选取二产比例和三产比例作为产业结构变量。(4)技术进步。科技水平是水资源绩效的重要影响因素之一，农业生产技术对农业水资源利用效率有积极作用，工业节水技术和污水处理技术的提升也能促进水资源效率提升。本文使用单位GDP耗水量表征区域技术进步水平。(5)对外开放。依托外部资源与经济要素，可以弥补本地区水资源禀赋的不足，本文假设对外开放程度越高，水资源效率越高。使用国际贸易进出口总额占GDP的比重表征对外开放水平。(6)用水结构。与产业结构类似，用水结构差异可能也影响水资源整体效率，过多的水资源用于低效率产业导致水资源效率降低。本文采用农业用水比例反映用水结构。(7)资源禀赋。水资源丰富地区可能存在浪费倾向，致使效率降低；水资源匮乏地区存在节水倾向，致使效率提升^[22]。因此选用人均水资源量作为资源禀赋的变量。基于变量构建面板数据回归模型，解释影响因素的作用机制。

1.3 数据来源

研究范围不包括港澳台地区，西藏数据缺失较多，在样本中剔除，计算30个省份2004—2018年水资源效率。所有投入产出指标和影响因素数据来源于2005—2019年《中国统计年鉴》，其中废水排放量、COD排放量、污水治理投资额、工业污水治理设施数、工业废水达标排放量来自2005—2019年《中国环境统计年鉴》，城市生活污水处理量来自2004—2018年《中国城市建设统计年鉴》。指标中GDP按2000年不变价折算，资本存量按永续盘存法估算，折旧率 $\sigma=9.6\%$ ，基期资本存量按式(3)计算，其中 $K_{i,2004}$ 为*i*省份2004年资本存量， g_{2004} 为2004年固定资产投资增速。

$$K_{i,2004} = \frac{I_{i,2004}}{(g_{2004} + \sigma)} \quad (3)$$

2 研究结果

2.1 基本特征

全国水资源效率整体较好，生产效率高于治理效率。2004—2018年，全国平均水资源效率为0.71，北京、上海、江苏、浙江、广东和青海6省市始终保持在最优前沿面(效率值为1)，贵州、新疆、山西和云南平均效率较低，小于0.4。高于平均值的有16个省份，低于的有14个省份。生产效率平均值为0.83，高于治理效率平均值0.75，处于最优前沿面的省份更多(9个)。30个省份中，生产效率高于治理效率的有20个省份，治理效率高于生产效率的仅有安徽、江西、广西和重庆4省市。进入21世纪以来，生产阶段技术水平已经充分提升，让水资源生产效率处于较高水平，治理效率有待加强。

两阶段网络模型效率显著高于单阶段模型水资源效率。单阶段模型效率全国平均仅为0.56，低于网络模型整体效率，也低于网络模型的生产阶段效率，平均提升0.15。单阶段效率仍然保持在最优前沿面的有4省市，综合效率高于单阶段模型效率的省份有23个，低于单阶段模型效率的为天津、山西和山东3省市。天津和山东在单阶段模型中达到最优前沿面，运用网络模型后，治理效率下降。江苏和浙江运用网络模型后，总体效率上升至最优前沿面。引入网络模型减小了非期望产出对单阶段模型测度的影响，效率水平更加真实地反映水资源利用全过程。基本特征表明我国省域水资源效率仍有上升空间，各地应该结合自身特

点，推动节水减排工作。

综合效率均值较低省份相对稳定，波动较小；均值较高省份波动较大。安徽、甘肃、贵州、陕西、四川、新疆等省区均值较低，2004—2018年效率值变化幅度小于0.1。福建、广西、海南、黑龙江、吉林、内蒙古等省区效率值在0.5~1.0之间波动，不能长期保持在较高水平。环境治理效率波动幅度大于生产效率波动幅度。生产效率的最低值为2016年新疆的0.449，多数省份在0.6~1之间波动。环境治理效率最低值为2004年贵州的0.159，多数省份效率在0.4~0.9之间波动。单阶段模型效率整体波动范围较小，均值较低。从两个模型的比较来看，网络模型减小了异常值的发生，综合效率的波动主要受治理效率影响。反映水资源环境治理的复杂性，不仅受经济波动影响，也受到政策和投入力度的影响。

2.2 时间演变特征

综合效率变化符合EKC规律，生产效率逐年降低，治理效率与综合效率变化一致，是决定综合效率的主要因素(图2)。综合效率2004—2012年由初期0.713波动至高点0.769再降至最低点0.658，2012年以后逐渐回升，2018年达到0.714。生产效率由2004年的0.883逐渐降低到2016年的0.770，2017—2018年略有回升。治理阶段效率同样先波动降低至2012年最低点0.679，后缓慢回升，与综合效率变化趋势基本一致，且明显低于生产效率，是影响综合效率的主要因素。单阶段模型时间演变特征与生产阶段一致。

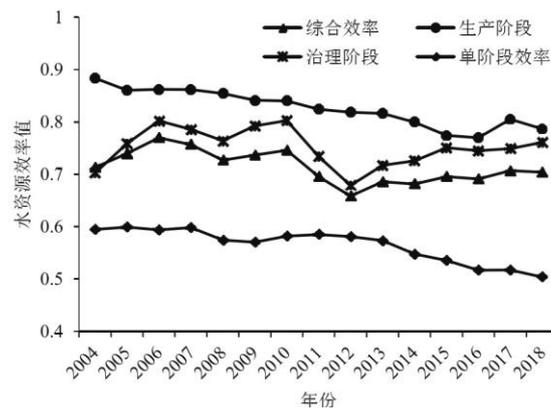


图2 2004—2018年中国水资源效率年度变化

15年间，中国水资源要素投入变化稳定，全国资本存量由28.16万亿元增长到354万亿元，人口规模由12.9亿稳步提高到14.03亿，水资源使用量由5547亿立方米增长到6021亿立方米，经济结构发展平稳，GDP由16.7万亿元增长到91.4万亿元。由此反映出我国水资源生产阶段要素投入产出比较稳定，各要素投入产出稳步扩大，随着规模增加边际效率递减。治理要素投入方面，虽然期望产出污水达标排放量和城市污水处理量有所增长，但整体治理效率提升缓慢。受经济波动和政策影响，水污染治理设施套数等部分投入产出存在波动，污水治理设施套数在13.2万~18.3万套之间波动，造成治理效率波动变化。因此，持续稳定的治理投入是治理效率保持提升的关键。

2.3 区域差异与时空演变

(1) 水资源效率仍以东西差异为主，南北差异特征不明显。

15年间东中西部平均综合效率分别为0.906、0.621、0.551，由东向西逐渐降低，产生梯度差异。生产效率和治理效率具有

同样特点。南北平均效率差异均在 0.02 以内，综合效率和生产效率北方略高于南方，环境治理效率南方略高于北方。时间变化上，南北方差异也未有明显变化，表明水资源效率区域差异以横向东西部差异为主，未向南北差异转变。比较不同模型测度结果，单阶段模型效率也呈现由东至西阶梯差异。相比单阶段模型，网络模型东中西部分别提高 0.121、0.221 和 0.114，中部地区提升较多，反映中部地区多以资源型省份为主，污染排放量相对较多。

(2) 水资源效率存在较明显的高值空间集聚。

截取 2005 年、2009 年、2013 年、2018 年 4 年截面考察水资源效率的时空演变。综合效率高值区主要集中在北方边境带(内蒙古、黑龙江)和东部沿海省份，随时间推移，高值区向东部沿海省份集中，如浙江、江苏、上海等省份。生产效率空间演变与综合效率类似，高值最终向东部沿海集中，如山东、江苏、浙江等省份。治理效率的高值区集中在东部地区，如山东、浙江、上海、江苏、广东等省份，随时间推移，有进一步向南方转移的趋势，江西、广西、福建等省份治理效率不断提升。东南地区因水资源丰富，生态本地条件优越，投入低而结果好。例如，江西提出生态优先战略，推进国家生态文明区建设，浙江安吉是“两山”理论发源地，福建率先开展生态省建设，保护八闽山水(图 3)。

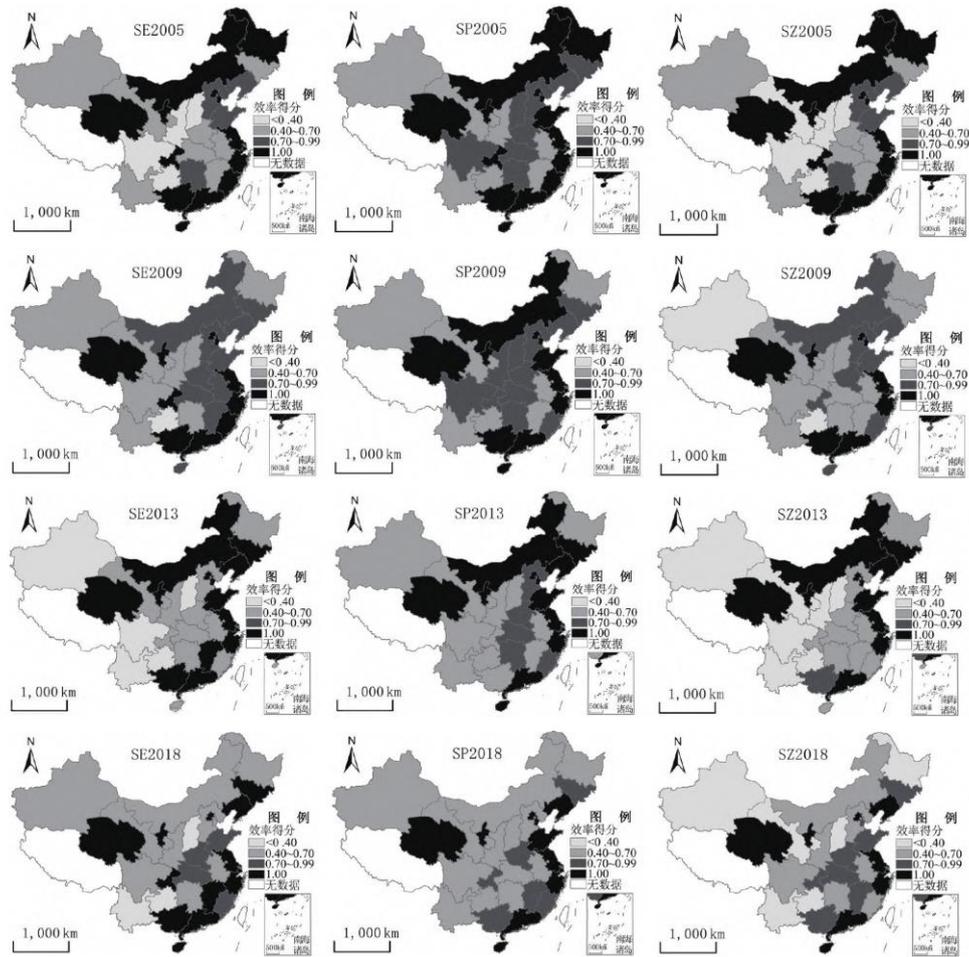


图 3 水资源效率时空演变

注：本图基于自然资源部国家地理信息公共服务平台下载的审图号为 GS(2020)4633 的标准地图制作，底图无修改。SZ 为综合效率；SP 为生产效率，SE 为治理效率，图 4 同。

(3)利用 ArcGIS 软件计算全国水资源效率的重心分布(图 4)。

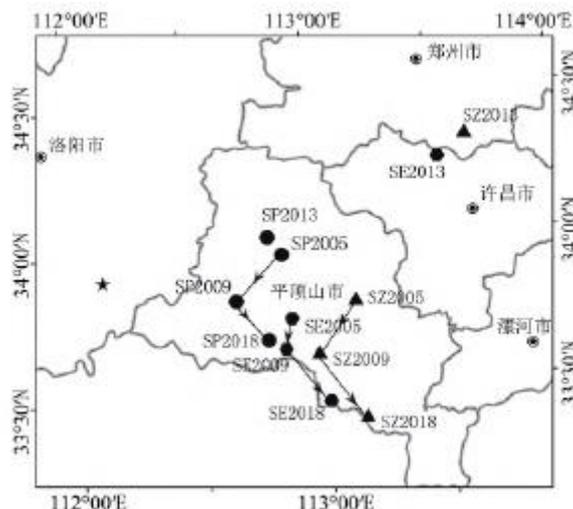


图 4 水资源效率的重心分布(★：地理重心)

全国水资源三大效率重心位于河南平顶山范围，综合效率、生产效率和治理效率重心逐渐南移，2013 年前后向北方波动。具体来说 2004—2018 年水资源利用效率的重心在 $112.5^{\circ} E \sim 113.5^{\circ} E$ 、 $33^{\circ} N \sim 34.5^{\circ} N$ 移动，且始终位于地理重心的东侧。这说明研究时段内中国水资源利用效率在空间上较为稳定，呈东强西弱的空间分布态势。分时段来看，2005—2009 年水资源利用效率重心向西南移动，2009—2018 年水资源利用效率重心向东南移动。其中 2013 年前后，重心向东北反方向波动，综合效率和治理效率波动幅度较大。分析其原因，研究时段内位于东北部的内蒙古、黑龙江等省份水资源效率呈现“下降—上升—下降”的波动式变化；东南部未达到最优效率的福建、江西、湖南、广西等省区水资源效率总体持续上升，因而形成了效率重心先向西南后向东南、中间波动的移动轨迹。未来治理效率可能出现南高北低趋势。

3 影响因素分析

首先对各影响因素进行 ADF 单位根检验，对外贸易占比(Rtrade)、农业用水比例(WRa)、技术水平(Wgdp)未能通过单位根检验，对其进行一阶差分后满足单位根要求。对所有变量进行标准化，进入回归模型。根据上文研究成果，水资源效率并非完全线性变化，选择 2012 年作为拐点，分效率恶化阶段(2005—2012 年)和效率改善阶段(2013—2018 年)两个时期进行计量回归分析。理由如下：党的十八大报告在推进生态文明建设论述中首次提出“从源头上扭转生态环境恶化趋势，为人民创造良好生产生活环境”的要求，国务院也制定了水资源消耗总量和强度双控方案，各省份积极开展水污染防治工作。

(1)经济发展水平、产业结构和用水结构是影响水资源效率的主要因素。

①人均 GDP 与水资源效率相关性由负转正，符合 EKC 曲线规律。从全国整体来看，效率恶化阶段人均 GDP 对综合效率、生产效率、治理效率影响系数显著为负，效率改善阶段综合效率、治理效率系数显著为正，随着人均 GDP 增加，水资源效率先降低后提升。人均 GDP 影响系数在通过检验的变量中最高，表明经济发展水平仍是影响水资源效率的最重要因素。②不同时期，产业结构作用机制有所差异。效率恶化阶段，二产比例回归系数为正，第二产业在水资源效率中起主导作用，工业生产率是提升水资源效率的关键变量。效率改善阶段，第三产业系数为正，第二产业系数为负，表明产业结构升级是促进水资源效率提升的关键。③用水结构在效率恶化阶段产生影响，在改善阶段影响不显著。2005—2013 年，农业用水比例对水资源效率影响显著为负，过高的农业用水比例不利于水资源效率的提升。

(2)产业结构作用机制具有空间差异性。

①东部地区产业结构因子中第三产业起主导作用。东部第二产业比重回归系数显著为负，第三产业比重显著为正，与全国整体并不一致。表明在效率恶化阶段和改善阶段，第三产业发展均有利于东部地区水资源效率的提升。东部多数省份已经进入创新引领发展阶段，主导产业信息技术、金融业、生活性服务业等耗水少而产出大，促进水资源效率提升。②中部地区产业结构因子中第二产业起主导作用。2005—2012年，第二产业比重与三个效率显著正相关，表明传统工业型省份水资源效率较高。中部地区多为资源型省份，内蒙古、山西、湖北等省份二产效率决定水资源整体效率。2013—2018年，农业用水比例与治理效率显著负相关，较高的农业用水比例不利于中部省份水资源效率的提升。河南、黑龙江、吉林等农业大省农业用水比例长期在70%以上，制约水资源效率的提升。③空间集聚是西部地区水资源效率的主要影响因素。效率恶化阶段，西部地区人口密度三大效率系数显著为负；效率改善阶段，人口密度治理效率系数显著为正，表明空间集聚较高的地区，如陕西、重庆、四川等省份的水资源效率决定西部地区的整体效率。

(3)集聚和技术水平影响生产效率，资源禀赋影响东部治理效率。

①除相同因素外，空间集聚有利于恶化阶段生产效率的提升，对外开放水平有利于改善阶段治理效率的提升。虽然国际贸易占比下降，但我国对外开放水平全方位提升，有利于区域通过灰水转移方式提升效率，或引进先进技术治理污染。②东部地区技术水平在两个阶段均有利于生产效率提升，资源禀赋仅对治理效率产生影响。东部地区单位GDP耗水量与综合效率和生产效率负相关，表明技术水平提升能够促进水资源效率提升；人均水资源拥有量与综合效率和环境治理效率负相关，表明资源禀赋对东部地区水资源效率产生影响，水资源丰富的地区治理效率较低，产生“资源诅咒”现象。

4 结论与讨论

本文运用含有生产和治理两阶段的网络DEA模型，分析中国省域水资源效率的时空演变特征与影响因素，阐明党的十八大以来效率变化的新特征与新机制。主要结论有：

(1)我国水资源生产效率高于治理效率，治理效率是影响综合效率的主要因素。时间上效率变化以2012年为拐点呈“U”型变化趋势，空间特征东西差异显著，南北差异不显著。

(2)经济发展水平、产业结构、用水结构是效率变化的主要影响因素，产业结构因子作用具有空间差异性，三产是东部地区关键因子，二产是中部地区关键因子。

(3)生产阶段主要受二产结构影响，治理阶段用水结构、水资源禀赋、空间集聚对治理阶段产生影响。

受总评价指标数量限制，未将生产和治理阶段进一步细分为农业、工业、生活系统是不足之处。2004—2008年综合效率波动上升的因素还需进一步深入考察。水资源效率区域差异性有利于政策制定者制定更加精准的用水政策，不同区域从产业结构、空间布局、技术水平等多种途径提升水资源效率。对水资源生产阶段和治理阶段的效率考察，明确了水资源管理的重点是治理阶段。党的十八大以来新阶段，第三产业、对外开放水平和空间集聚成为促进水资源效率提升的关键因子。但也发现很多影响因子的作用机制不显著或仅对局部区域产生作用，未来还需进一步优化水资源利用系统结构和空间结构，发挥技术水平、跨区域合作在水污染防治和效率提升中的作用。

参考文献：

[1]Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Emeasuring the efficiency of decision making units[J]. European Journal of

Operational Research, 1978, 2 (6) : 429-444.

[2]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(10): 1696-1703.

[3]马海良, 黄德春, 张继国, 等. 中国近年来水资源利用效率的省际差异: 技术进步还是技术效率[J]. 资源科学, 2012(5): 794-801.

[4]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(2): 273-279.

[5]Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3) : 498-509.

[6]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(1): 121-133.

[7]Shi T G, Zhang X L, Du H R, et al. Urban water resource utilization efficiency in China[J]. Chinese Geographical Science, 2015, 25 (6) : 684-697.

[8]赵良仕, 孙才志, 刘凤朝. 环境约束下中国省际水资源两阶段效率及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017(5): 27-36.

[9]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(7): 12-19.

[10]田贵良, 盛雨, 卢曦. 水权交易市场运行对试点地区水资源利用效率影响研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2020(6): 146-155.

[11]方创琳, 关兴良. 中国城市群投入产出效率的综合测度与空间分异[J]. 地理学报, 2011(8): 1011-1022.

[12]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(12): 84-94.

[13]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.

[14]赵良仕, 冷明祥, 孙才志. 基于多维产出 ZSG-DEA 模型的中国水资源污染综合分配效率测算[J]. 水资源保护, 2021(6): 94-102.

[15]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.

[16]刘树峰, 杜德斌, 覃雄合, 等. 基于创新价值链视角下中国创新效率时空格局与影响因素分析[J]. 地理科学, 2019(2): 173-182.

[17]万伦来, 朱泳丽, 万小雨. 排污费、环保补助与中国工业两阶段环境效率——来自中国 30 个省份的经验数据[J]. 生态经济, 2016(8): 47-52, 72.

-
- [18]韩颖,张珊.中国省际农业用水效率影响因素分析——基于静态与动态空间面板模型[J].生态经济,2020(3):124-131.
- [19]邓光耀,张忠杰.基于网络SBM-DEA模型和GML指数的中国各省工业用水效率研究[J].自然资源学报,2019(7):1457-1470.
- [20]巩灿娟,徐成龙,张晓青.黄河中下游沿线城市水资源利用效率的时空演变及影响因素[J].地理科学,2020(11):1930-1939.
- [21]吴玉鸣,田斌.省域环境库兹涅茨曲线的扩展及其决定因素——空间计量经济学模型实证[J].地理研究,2012(4):627-640.
- [22]马海良,王若梅,訾永成.中国省际水资源利用的公平性研究[J].中国人口·资源与环境,2015(12):70-77.