

京津冀绿色水资源利用效率及其时空差异与驱动因素分析

李健, 谢衡

(天津理工大学 循环经济与企业发展研究中心, 天津 300384)

摘要: 京津冀是我国水资源短缺情况最为严重的地区之一,提高绿色水资源利用效率是从根本上解决该地区水资源供需矛盾、实现经济-社会-生态和谐发展的必由之路。基于考虑非期望产出的 Super-SBM 模型测度 2008-2018 年京津冀城市群绿色水资源利用效率并对其时空差异进行分析,随后利用地理探测器模型探究绿色水资源利用效率驱动因素。结果表明:研究期内京津冀城市群绿色水资源利用效率均值处于非有效状态,且呈不稳定的波动态势,城市群内部效率极差较大;绿色水资源利用效率地区差异明显,北部地区高于南部地区,且南北差异呈增大趋势;人口规模、产业结构、自然资源条件和经济发展水平对提升京津冀城市群绿色水资源利用效率的驱动效应显著,城市开放程度的驱动效果提升较快但尚不稳定,而科技发展水平的驱动作用始终较低且呈减小趋势。

关键词: 绿色水资源利用效率; Super-SBM 模型; 时空差异; 地理探测器; 驱动因素; 京津冀城市群

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2021)06-0010-09

Calculation of green water resources utilization efficiency in Jing-Jin-Ji urban agglomeration and analysis of its spatio-temporal differences and driving factors

LI Jian, XIE Heng

(Research Center for Circular Economy and Sustainable Development of Enterprises, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: Jing-Jin-Ji urban agglomeration is one of the areas with the most severe water shortages in China. Improving the utilization efficiency of green water resources is the only way to solve the contradiction between the supply and demand of water resources and realize the harmonious development of economy, society and ecology. Here, we measured the green water resources utilization efficiency of Jing-Jin-Ji urban agglomeration from 2008 to 2018 and analyzed its spatio-temporal differences using the Super-SBM model, with the consideration of unexpected output. And then the geographic detector model was used to explore the driving factors of green water resources utilization efficiency. The results show that the average utilization efficiency of green water resources did not reach the DEA effective state in Jing-Jin-Ji urban agglomeration, which was in an unstable state with fluctuations, and there was a big gap between the maximum and minimum efficiency of the urban agglomeration. The green water resources utilization efficiency varied greatly in different regions of the agglomeration, which was high in the northern region but low in the southern region, and the difference was increasing. Population size, industrial structure, natural resources and economic development had a significant driving effect on the improvement of the green water resources utilization efficiency in Jing-Jin-Ji urban agglomeration. The driving effect of urban openness had improved rapidly but was not stable; but that of the scientific and technological development level was always low and showed a downward trend.

Key words: green water resources utilization efficiency; Super-SBM model; spatio-temporal difference;

收稿日期:2021-05-18; 修回日期:2021-09-03

基金项目:天津市科技计划项目(18ZLXZF00390)

作者简介:李健(1963-),男,河北沧州人,教授,博士生导师,研究方向为资源环境管理、循环经济与生态工业工程。

通讯作者:谢衡(1995-),女,辽宁本溪人,硕士研究生,研究方向为循环经济与生态工业工程。

geographic detector model; driving factor; Jing - Jin - Ji urban agglomeration

1 研究背景

作为维系生命和健康的基础,淡水资源是人类生存和发展不可或缺的自然资源。然而研究表明,目前全球80多个国家,约15亿人口面临淡水不足的问题,水资源短缺已成为制约生态文明建设和经济社会可持续发展的重要因素^[1]。党和国家高度重视水资源短缺问题,国务院早在2012年发布的《关于实行最严格水资源管理制度的意见》中就明确划定了水资源开发利用、用水效率及水功能区限制纳污的三条红线^[2],2014年,习近平总书记又从全局和战略的高度提出了“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的新时期治水思路。

水资源利用问题的核心是效率问题^[3],提高水资源利用效率特别是绿色水资源利用效率是从根本上解决水资源供需矛盾、实现经济社会与生态环境和谐发展的必由之路。京津冀城市群是我国经济发展的重要引擎,也是我国水资源短缺情况最为严重的地区之一,其人均水资源量仅为全国人均水平的9.77%,且水资源分布不均、水污染问题严峻,水资源缺乏问题已成为京津冀地区发展的最大“短板”^[4]。在此背景下,研究京津冀城市群绿色水资源利用效率,贯彻落实绿色发展理念,对促进京津冀一体化进程和区域经济绿色发展具有重要意义。

随着水资源问题的日益凸显,水资源利用效率问题受到学术界越来越多的关注。在已有研究中,学者们主要集中于水资源效率水平测度及驱动因素研究等方面。在效率测度方法上主要有指标体系法^[5]、层次分析法^[6]、随机前沿分析法^[7-8]、数据包络分析法等。其中数据包络分析法(data envelopment analysis, DEA)由于具有无需事先确定函数关系、非主观赋权、可有效测量多投入和多产出的相对效率问题等优点,成为在水资源利用效率研究中应用最为广泛的方法之一^[9]。朱达等^[10]运用CCR(charnes - Cooper - Rhodes)模型对我国城市水资源利用效率情况进行了分析,并得出城市水资源利用效率的排名;Azad等^[11]运用非径向DEA方法对农业灌溉用水效率进行了测度研究;Oulmane等^[12]运用DEA模型分别测算了阿尔及利亚东北部小型农场的技术效率和水资源利用效率。随着研究的深入,人们发现在实际生产过程中不仅有期望产出,如GDP,还有非期望产出,如废水。因此考虑非期望产出的SBM(slack based model)模型被越来越多地应

用到水资源利用效率的研究中。Deng等^[13]利用SBM-DEA模型以污水排放量为非期望产出对我国31个省(市、自治区)用水效率进行了分析;孙才志等^[9]运用SBM模型以农业、工业、生活中的灰水足迹为非合意产出测算了省际水资源利用效率;杨高升等^[14]运用SE-SBM(super efficiency - slack based model)模型,以人类可持续发展指数为期望产出,以污水排放总量为非期望产出测度了长江经济带11个省(市)的水资源利用效率。Shi等^[15]采用SBM-DEA模型对我国216个城市的水资源利用效率进行了实证分析。

在水资源利用效率影响因素的研究方面,学者们较多关注于经济发展水平、自然资源禀赋、对外开放程度、产业结构及政府影响力等因素对水资源利用效率的影响。如任玉芬等^[1]运用Tobit回归模型探讨了城市人口、经济发展水平、产业结构、水资源管理政策等因素对生态地理区城市用水效率的影响;俞雅乖等^[16]采用Tobit回归模型发现,经济发展水平与用水结构对中国水资源利用效率具有负向影响,而科技发展水平对水资源利用效率具有正向影响;赵良仕等^[17]运用空间计量模型探究了中国省际水资源利用效率的驱动因素,结果表明各地区水资源利用效率整体存在空间溢出效应,经济发展水平与对外开放程度对水资源整体利用效率具有显著正向驱动作用。

通过对以往文献的梳理发现,现有研究在绿色水资源利用效率的测算上,大多数学者倾向于只考虑经济与环境因素,并不能全面、科学地反映经济、社会与环境之间的关系,这会导致效率测算值与实际情况存在偏差。此外在考虑区域水资源利用效率的影响因素时,学者们倾向于选择空间模型和Tobit模型,但运用这些模型,可能会由于检验不到位而忽视多变量之间的共线性问题,导致研究结果无法准确地反映现实状况。基于此,本文在考虑非期望产出特性的基础上引入可持续发展指数(sustainable development index, SDI),运用Super-SBM模型测度京津冀城市群绿色水资源利用效率,运用ArcGIS软件分阶段绘制时间分位图以揭示水资源利用效率的时空分布特点,并将地理探测器模型应用于区域绿色水资源利用效率驱动因素的探究上,为研究提供更具真实性与代表性的理论依据,以期改善京津冀水资源现状、提升城市群绿色水资源利用效率提供参考和借鉴。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

京津冀城市群是我国三大城市群之一,涵盖北京市、天津市和河北省 11 个地级市(张家口、承德、秦皇岛、唐山、沧州、衡水、廊坊、保定、石家庄、邢台和邯郸)。全域面积约为 $21.6 \times 10^4 \text{ m}^2$,地势西北高、东南低,自西北向东南倾斜,京津冀城市群概况见图 1。京津冀地处我国华北平原的中北部,属温带季风气候,降水量少且多集中在汛期,水资源短缺。2018 年京津冀水资源总量为 $217.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。仅占全国水资源总量的 0.79%;地区人均水资源量为 192.7 m^3 ,不及全国人均水平(1971.8 m^3)的 1/10。此外京津冀地区面临严重的水污染问题,2018 年北京、天津、河北各地区地表水中 V 类水占比分别高达 21.0%、25.0% 和 20.3%,显著高于全国平均水平(6.7%)。

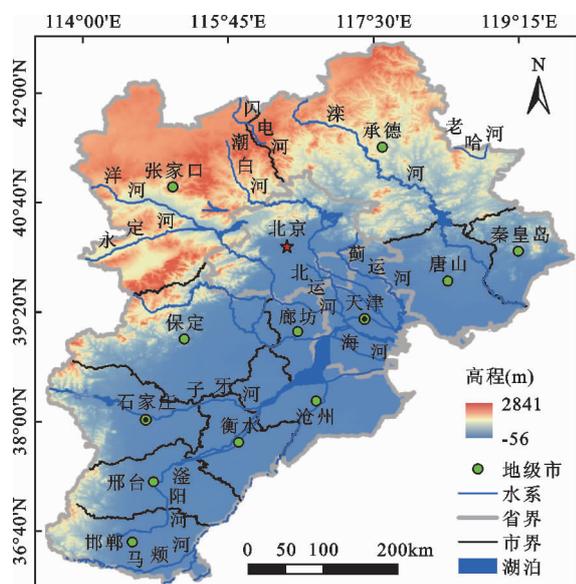


图 1 京津冀城市群概况图

2.2 指标选取及数据来源

2.2.1 绿色水资源利用效率指标构建 本文对北京市、天津市及河北省 11 个地级市 2008 - 2018 年的绿色水资源利用效率进行测算,指标分为投入型和产出型两类。具体指标见表 1。

(1) 自然资源投入。用水总量可以体现出人类消费水资源量的真实情况,具体包括农业用水、工业用水、生活用水和生态用水 4 个领域,可以反映出“经济 - 社会 - 生态”系统生产投入的真实水资源量^[3]。

(2) 资本投入。本文以资本存量作为资本投入

的评价指标,采用永续存盘法来估计资本存量,在折旧率的取值方面,本文参照张军等^[18]采用的算法,折旧率取值为 9.6%。

(3) 劳动投入。选取 2008 - 2018 年京津冀城市群城镇单位就业人员数量为劳动投入指标。具体计算方法为“(上一年末城镇单位就业人员数量 + 本年末城镇单位就业人员数量)/2”。

(4) 经济产出。地区生产总值(GRP)是指该地区所有常住单位一定时期内生产活动的最终成果,相比国内生产总值(GDP),它可以更精确地反映出某一地区在一段时间内的经济效益。本文选取地区生产总值为经济产出指标,考虑价格变动的因素,本文以 1978 年为基期计算各地区实际的生产总值。

(5) 社会产出。水资源的绿色发展可以促进人与环境的和谐发展,进而实现“自然、经济、社会”整体关系的协调。本文借鉴杨高升等^[14]、孙才志等^[3]的研究成果将 SDI 指数作为期望产出指标,从人口、城市化水平、政府对科教重视度、医疗水平、知识水平等角度构建 SDI 指数评价指标。

(6) 环境产出。在实际生产过程中不仅存在期望产出,还存在非期望产出,本文将京津冀城市群污水排放量作为环境产出中的非期望产出,包括工业、生活、农业和生态 4 个领域的污水,其中河北省 11 个地级市除工业污水外其他领域污水排放数据覆盖不全,因而通过“(河北省污水排放总量 - 河北省工业污水排放总量)/河北省总人口 × 各地级市常住人口”计算得出。

表 1 京津冀城市群绿色水资源利用效率 SBM 指标

指标类型	变量	定义/单位
投入指标	自然资源投入	用水总量/ 10^8 m^3
	资本投入	资本存量/ 10^8 元
	劳动投入	就业人员数量/ 10^4 人
产出指标	经济产出	GRP/ 10^8 m^3
	社会产出	SDI 指数/%
	环境产出	污水排放量/ 10^4 t

2.2.2 影响因素变量选取 城市绿色水资源利用效率的高低是区域经济发展水平、自然环境条件、产业结构、对外开放水平、水资源利用方式等多种因素共同作用的结果,因此本文参考学者丁绪辉等^[19]、俞雅乖等^[16]在构建评价指标上的经验,在综合考虑京津冀地区具体水资源分布情况和绿色发展水平的基础上,从自然资源条件、经济发展水平、产业结构、

城市开放程度、人口规模及科技发展水平等 6 个方面探究京津冀城市群绿色水资源利用效率的影响因素。各影响因素的变量定义如表 2 所示。

本文数据来源于 2009 - 2019 年《中国统计年鉴》^[20]《中国城市统计年鉴 2009 - 2019》^[21]及相应年份河北省 11 个地级市国民经济与社会发展统计公报。

表 2 京津冀城市群绿色水资源利用效率影响因素

影响因素	变 量
自然资源条件	人均水资源量 x_1 / m^3
经济发展水平	人均 GDP $x_2 / 10^4$ 元
产业结构	第二产业比重 $x_3 / \%$
	第三产业比重 $x_4 / \%$
城市开放程度	进出口总额 $x_5 / 10^8$ 元
人口规模	地区常住总人口 $x_6 / 10^4$
科技发展水平	科技与教育支出占地方
	财政支出汇总比例 $x_7 / \%$

2.3 研究方法

2.3.1 Super - SBM 模型 本文选取考虑非径向、非角度基于松弛变量的 Super - SBM 模型测算京津冀绿色水资源利用效率,在考虑废水作为非期望产出的基础上,将可持续发展指数(SDI)纳入期望产出,解决了松弛变量及数据不全对绿色水资源利用效率结果的影响,使测算结果更加准确。具体评价模型如公式(1)所示。

$$\min \rho = \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\bar{x}}{x_{ik}}}{\frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{p=1}^{s_1} \frac{\bar{y}^d}{y_{pk}^d} + \sum_{q=1}^{s_2} \frac{\bar{y}^u}{y_{qk}^u} \right)}$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \bar{x} \geq \sum_{j=1, \neq k}^n x_{ij} \theta_j \\ \bar{y}^d \leq \sum_{j=1, \neq k}^n x_{pj} \theta_j \\ \bar{y}^u \geq \sum_{j=1, \neq k}^n x_{qj} \theta_j \\ \bar{x} \geq x_k, \bar{y}^d \leq y_k^d, \bar{y}^u \geq y_k^u \\ i = 1, 2, \dots, m; p = 1, 2, \dots, s_1; q = 1, 2, \dots, s_2 \\ \theta_j > 0, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

式中: x, y^d, y^u 分别为投入变量、期望产出变量和非期望产出变量; m, s_1, s_2 分别为投入变量、期望产出变量和非期望产出变量的个数; $\bar{x}, \bar{y}^d, \bar{y}^u$ 分别为投入

变量、期望产出变量和非期望产出变量的冗余量; θ 为权重向量; n 为决策单元(decision making unit, DMU) 个数; k 为被评价单元; ρ 为绿色水资源利用效率值,当 $\rho < 1$ 时,说明该 DMU 处于无效率状态,当 $\rho \geq 1$ 时,表示该 DMU 有效。

2.3.2 地理探测器 地理探测器模型作为一种新的统计学方法,由于其可以有效解决假设条件过多的约束被广泛应用于区域经济、生态环境及医疗领域。本文运用地理探测器模型探究区域自然资源条件、经济发展水平、产业结构、城市开放程度、人口规模及科技发展水平等因素对京津冀城市群绿色水资源利用效率的影响。具体模型如公式(2)所示。

$$P_{D,H} = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{i=1}^h N_i \sigma_i^2 \quad (2)$$

式中: $P_{D,H}$ 为绿色水资源利用效率空间分异影响因素探测力指标, $P_{D,H}$ 值的大小表示该因素对京津冀城市群绿色水资源利用效率空间分异解释力的强弱; h 为自变量的分类个数(分层或分区); N 和 N_i 分别为整体和各因素类型 i 的样本个数; σ^2 和 σ_i^2 分别为整个区域和各类型 i 的离散方差。

3 结果与分析

3.1 基于 Super - SBM 模型的绿色水资源利用效率分析

在考虑非期望产出的基础上将可持续发展指数作为期望产出投入 Super - SBM 测算模型,测算 2008 - 2018 年京津冀 13 个城市绿色水资源利用效率,结果见表 3。由表 3 可知,2008 - 2018 年京津冀城市群整体绿色水资源利用效率普遍未达到 DEA 有效状态,仍有很大提升空间。从纵向来看,2008 - 2018 年京津冀城市群绿色水资源利用效率各年份均值在 0.808 ~ 0.953 之间变化,2008 - 2015 年总体呈波动增大态势,到 2015 年达到峰值,随后出现明显的减小。说明京津冀地区绿色水资源利用效率整体向好,但效果上缺乏稳定性。从横向来看,地区差异较大,2008 - 2018 年效率最高的地区均值达到 1.316(北京市),但效率最低的地区仅为 0.429(邯郸市),需要改善水资源利用的空间布局。

通过对表 3 中北京市、天津市、河北省 3 个区域整体数据的对比分析,发现河北省整体绿色水资源利用效率均值为 0.811,远低于北京市(1.316)和天津市(1.120)。造成北京市、天津市、河北省绿色水资源利用效率非均衡发展的原因是多方面的,从投入产出规模来看,以 2018 年的投入产出数据为例,2018 年河北

省水资源投入总量为 $182.4 \times 10^8 \text{ m}^3$, 是北京市 ($39.3 \times 10^8 \text{ m}^3$) 的 4.6 倍, 是天津市 ($28.4 \times 10^8 \text{ m}^3$) 的 6.4 倍; 在资本存量投入上, 河北省分别为北京市和天津市的 3 倍和 2 倍; 但在期望产出方面, 2018 年河北省社会发展指数为 24.95, 约为北京市 (67.98) 的 1/3, 不足天津市 (57.98) 的 1/2, 而非期望产出废水的排放量却远超北京市、天津市。由此可以看出, 河北省投入资本并没有得到充分有效的利用, 存在严重期望产出不足和非期望产出冗余的现象。从产业结构来看, 河北省主要以传统制造业和农业为主, 水资源利用体系不完善, 粗放的发展方式使得河北省实现水资源绿色转型升级的难度增大。北京市第三

产业比重远远超过第一、二产业, 持续占据主导地位。第三产业与第一、二产业相比具有高技术、低能耗、低污染等特点, 对绿色水资源利用效率的提升具有很好的促进作用。天津市的绿色水资源利用效率水平高于河北省, 但与北京市相比还存在差距, 原因在于天津市水资源时空分布不均、水污染问题严重致使水资源短缺, 此外在天津市经济高速发展的同时, 产业结构分布不合理, 加之经济发展对人口产生虹吸效应, 使得水资源供给压力显著增大。因此天津市有必要适度减缓经济发展速度, 合理布置产业结构, 优化人口结构分配, 强化污水排放标准执行力度, 进而促进天津地区水资源的绿色发展。

表 3 2008—2018 年京津冀城市群绿色水资源利用效率

城市(省)	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	均值	排名
北京	1.263	1.336	1.258	1.280	1.231	1.270	1.299	1.352	1.432	1.364	1.392	1.316	1
天津	1.082	1.091	1.145	1.100	1.100	1.127	1.218	1.208	1.145	1.070	1.035	1.120	4
石家庄	0.854	0.859	1.151	0.947	1.186	1.118	1.075	1.170	1.277	0.942	0.670	1.023	6
承德	1.348	1.338	1.188	1.222	1.191	1.254	1.145	1.200	1.300	1.210	1.222	1.238	3
张家口	0.581	0.615	0.627	0.623	0.657	0.556	1.008	1.005	1.075	1.032	1.024	0.800	7
秦皇岛	1.158	1.197	1.246	1.231	1.307	1.340	1.338	1.224	1.271	1.380	1.412	1.282	2
唐山	1.122	1.099	1.089	1.108	1.103	1.090	1.091	1.078	1.024	1.138	1.160	1.100	5
廊坊	0.401	0.485	0.484	0.525	0.537	0.424	0.539	1.006	0.571	0.338	0.392	0.518	11
保定	0.555	0.627	0.709	0.933	0.703	0.454	0.637	0.791	0.560	0.496	0.477	0.631	10
沧州	0.681	0.649	0.685	0.747	0.744	0.611	0.711	0.703	0.677	0.619	0.574	0.673	9
衡水	1.063	1.061	1.039	1.030	0.751	0.621	0.513	0.652	0.678	0.356	0.413	0.743	8
邢台	0.400	0.408	0.477	0.578	0.547	0.494	0.532	0.530	0.476	0.449	0.466	0.487	12
邯郸	0.477	0.487	0.470	0.584	0.545	0.423	0.417	0.468	0.316	0.262	0.266	0.429	13
河北	0.785	0.802	0.833	0.866	0.843	0.762	0.819	0.894	0.839	0.747	0.734	0.811	
均值	0.845	0.866	0.890	0.916	0.892	0.829	0.886	0.953	0.908	0.820	0.808		

通过对比分析表 3 中京津冀 13 个城市绿色水资源利用效率情况, 发现北京、秦皇岛和承德 3 市绿色水资源利用效率相对较好, 达到 1.2 以上, 同时效率达到有效状态的城市还有天津、唐山和石家庄。北京市作为我国首都, 其资本和能源的投入十分充足, 期望产出远高于其他城市, 使得北京市绿色水资源利用效率领先于天津市及河北省的 11 个地级市。天津市的绿色水资源利用效率处于较高水平, 但较北京、秦皇岛和承德 3 市还存在一定差距, 主要是因为天津市水资源时空分布不均匀, 致使水资源压力较大。秦皇岛、承德、唐山和石家庄等 4 个地级市在经济规模、资本和能源投入与期望产出等方面均与北京市、天津市存在着差距。秦皇岛市由于地处沿海, 城市服务业发展较快, 对水体的破坏程度不大, 此外秦皇岛市在水资源投入上均处于低梯度, 其年

平均水资源使用量为 $5.35 \times 10^8 \text{ m}^3$, 仅为北京市年平均水资源使用量的 1/7, 但社会发展指数却达到了北京市的一半以上, 较低的投入得到较高的期望产出, 使其水资源利用效率具有优势。承德市地处京津冀水系上游, 境内有滦河、潮白蓟运河、辽河、大凌河四大水系, 水质优良, 水量充沛, 因此绿色水资源利用效率长期处于有效状态。唐山市绿色水资源利用效率有效主要是因为用水效率较高, 海霞等^[22]研究发现, 唐山市综合用水效率达到有效状态, 其农业用水效率处于较高水平。石家庄市的绿色水资源利用效率在研究期内的波动较大, 峰值达到 1.277 (2016 年), 而低谷值仅为 0.670 (2018 年), 因而保持绿色水资源利用效率水平处于稳定状态是当前石家庄市的首要目标。

由表 3 可以看出, 张家口、廊坊、保定、沧州、衡

水、邢台和邯郸等城市的绿色水资源利用效率各年份均值未达到有效状态,张家口市虽位列第 7,但与第 6 名的石家庄市仍存在较大差距。衡水市绿色水资源利用效率较低与承接北京市非首都功能有直接关系,随着北京市产业的转移,衡水市固定资产投资成倍数增长,产出增长速度远不及投入增长速度。沧州和保定两市为农业用水重点城市,其农业用水量约为秦皇岛市农业用水量的 6 倍,优化这两个城市的产业结构,提升农业用水效率十分必要。邢台、邯郸和廊坊这 3 个城市的绿色水资源利用效率整体水平远低于其他城市,其中廊坊市因水资源相对匮乏,且产业多为家具制作、生物医药,使得固定资本、水资源投入较大,但经济产出相对较低。邢台市和邯郸市在地理位置上处于京津冀水系下游,距核心城市相对较远,区域优势不足导致绿色水资源利用效率长期偏低。

图 2 直观展示了 2008 - 2018 年河北省 11 个地级市绿色水资源利用效率的变化趋势。

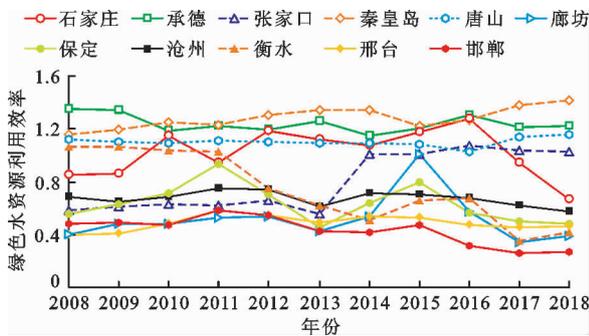


图 2 2008 - 2018 年河北省 11 个地级市绿色水资源利用效率变化趋势

3.2 绿色水资源利用效率时空差异

为进一步探究京津冀城市群绿色水资源利用效

率的时空演化特征,运用 ArcGIS 软件分别绘制了京津冀城市群 13 个城市 2008、2013 和 2018 年绿色水资源利用效率时空分异图,见图 3。将北京市及其以北区域定义为京津冀北部地区,北京市以南定义为京津冀南部地区。由图 3 中可以看出,北部地区,北京、承德两市一直处于极高效率状态;秦皇岛市从高效率逐步过渡到极高效率;天津市和唐山市稳定在高效率状态;张家口市一直保持在低效率区间,但在 2014 年骤升至高效率(见图 2),这主要是因为 2014 年以后张家口市在维持非期望产出不变的情况下有较高的期望产出(可持续发展指数),说明该区域绿色发展已初见成效。南部地区,衡水、沧州和石家庄 3 市的绿色水资源利用效率好于其他地区,但均有不同程度的下降;石家庄市绿色水资源利用效率呈先增大后减小的趋势,2012 - 2016 年均达到有效状态,但自 2017 年开始效率大幅度减小(见图 2);衡水市的效率一直处于波动减小状态,由 2008 年的高效率水平下降为 2018 年的低效率水平;沧州市一直在中效率水平与低效率水平之间浮动;其他 4 个城市绿色水资源利用效率则一直处于低效率水平。通过对比可以看出,随时间变化京津冀城市群绿色水资源利用效率不均衡现象的改善尚不明显,北部地区绿色水资源利用效率普遍达到较高效率水平,南部地区普遍稳定在中低效率水平,南北部效率差异呈增大态势。

3.3 京津冀城市群绿色水资源利用效率驱动因素分析

利用地理探测器的因子探测模型识别京津冀城市群绿色水资源利用效率的主要驱动因素,囿于篇幅,选择研究的始、末及中间节点,分别对 2008、2013 和 2018 年 3 个年份进行分析,结果如表 4 所示。

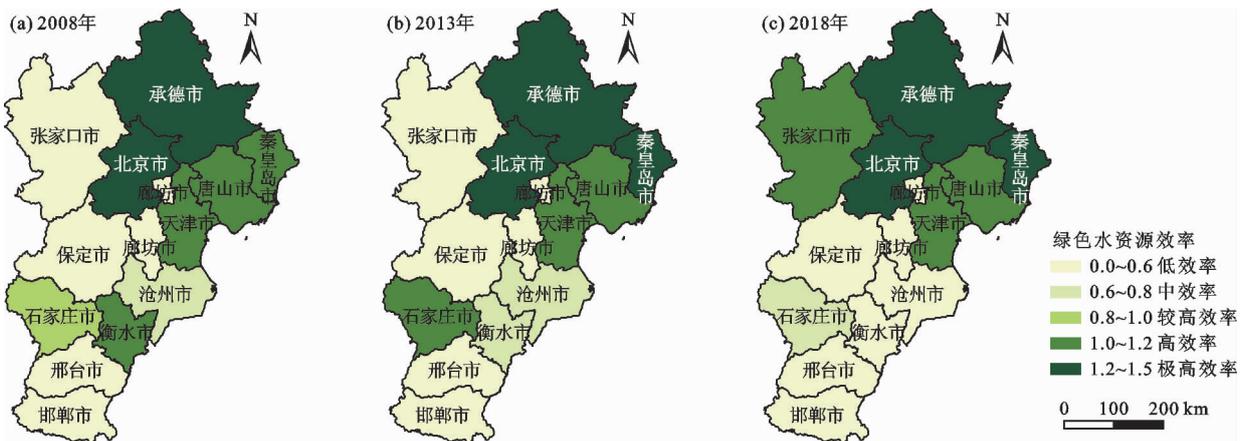


图 3 2008、2013 和 2018 年京津冀城市群绿色水资源利用效率时空分异图

研究期内探测变量均通过了5%水平下的显著性检验,说明本文选取的指标与京津冀城市群绿色水资源利用效率变化具有相对一致性,可以较好地解释城市群绿色水资源利用效率的差异性。将京津冀城市群绿色水资源利用效率前4位的影响因素按作用强度排序并打分(按排名前后顺序记4~1

分),则2008年为 $x_1 > x_2 > x_3 > x_5$ 、2013年为 $x_4 > x_6 > x_2 > x_1$ 、2018年为 $x_6 > x_4 > x_5 > x_3$,通过分数比较发现京津冀城市群绿色水资源利用效率的核心驱动力为 x_6 (7分)、 x_4 (7分)、 x_1 (5分)、 x_2 (5分),即人口规模、第三产业比重、自然资源条件及经济发展水平对水资源的驱动效果相对明显。

表4 2008-2018年京津冀城市群绿色水资源利用效率主要驱动因素探测因子 P_{DG} 结果

影响因素	变量名称	年份			驱动作用
		2008	2013	2018	
自然资源条件	人均水资源量 x_1	0.483***	0.288***	0.356***	↓
经济发展水平	人均GDP x_2	0.391***	0.422***	0.326***	↓
产业结构	第二产业比重 x_3	0.277***	0.240***	0.460***	↑
	第三产业比重 x_4	0.264**	0.739***	0.644***	↑
城市开放程度	进出口总额 x_5	0.277***	0.240***	0.460***	↑
人口规模	地区常住总人口 x_6	0.248**	0.574***	0.654***	↑
科技发展水平	科技与教育支出占地方财政支出汇总比例 x_7	0.242***	0.205***	0.206***	↓

注:“***”和“**”分别表示在1%和5%的显著水平下通过检验。

人类的生产和生活均离不开水资源,根据统计数据,2018年全国生产和生活用水占水资源总量的20.8%,人类活动对水资源效率的影响不言而喻。目前国家大力发展第三产业,第三产业与一、二产业相比具有高技术、低能耗、低污染等特点,对绿色水资源利用效率的提升具有很好的促进作用。此外,根据环境库兹涅兹曲线环境偏好论可知,良好的经济发展水平会促使人们提出更为严格的环境要求,从而偏向于选择低水耗的绿色产品,进而驱动地区绿色水资源利用效率的提升。

从探测因子作用强度时序演化来看,探测因子第二产业比重(x_3)、第三产业比重(x_4)的解释力均呈不同程度的上升状态,说明随着我国创建生态文明与资源节约型城市力度的加大,产业节水能力逐渐提升,第二产业中节水技术的应用极大缩小了其第三产业的耗水差距,使得产业结构对区域绿色水资源利用效率的驱动作用呈逐渐增强态势。由于进出口产品与水资源利用的替代作用,城市开放程度将会影响高水耗产品的进出口比例,从而对区域绿色水资源利用效率产生影响。 x_5 驱动力效果增幅较大,但存在波动,说明京津冀城市群对外开放市场还不够成熟,进出口贸易还不够稳定,因此应加大对进出口情况管理的力度,亟须建立并完善稳定的区域对外开放合作平台。地区常住总人口(x_6)对区域

绿色水资源利用效率的驱动作用呈大幅度提升状态,一方面由于人们思维观念的转变使得新增人口减少,另一方面,随着城市功能的日趋完善,人口结构也日趋合理。驱动力下降的因素有自然资源条件、经济发展水平及科技发展水平。 x_1 的解释力由2008年的0.483减小到2018年的0.356,说明随着能源结构的不断优化和区域节能减排措施的实施,加强了区域污水的回收利用,从而减少了区域污水的排放,很大程度上缓解了地区水资源压力。 x_7 的整体驱动强度不大,呈缓慢下降趋势,说明随着地区科技教育水平的提高,人口节水意识提升并不明显,因此应更加注重生态文明意识的培养。

4 讨论

4.1 京津冀城市群绿色水资源利用效率及其时空分布

通过测算发现,京津冀城市群2008-2018年期间绿色水资源利用效率均值未达到DEA有效状态,水资源利用效率存在较大提升空间。国内学者徐承红等^[23]和赵良仕等^[24]的研究成果均证实了这一论点。产生这一现象的原因可能在于我国产业结构分布主要以第一、二产业为主,加之我国以往追求经济发展而忽视环境保护的粗放型发展模式,导致我国生产方式相对落后,节水效率低,水污染问题严重,

最终使得区域绿色水资源效率较低。

研究区域内部绿色水资源利用效率发展不均衡现象明显,区域之间差距较大。北京市绿色水资源利用效率明显优于天津市,而天津市优于河北省11个地级市,这与马海良等^[25]的研究结果一致。绿色发展情况在一定程度上受地区经济发展水平的影响,经济发展水平越好的地区,其科技带动效应相对较强,绿色创新产业发展充分,进而使得绿色水资源利用效率越高^[14,26]。

此外研究发现京津冀城市群内部绿色水资源利用效率随时间推进呈不同的变化趋势,北部地区绿色水资源利用效率普遍提高,且达到较高效率水平,南部地区则普遍处于在中低效率水平。这可能是由于本文在探究水资源利用效率时,将环境变量与社会变量一同考虑在内,因此本文所得出的绿色水资源利用效率的高低不仅和区域经济发展情况有关,还与区域资源拥有量和产业结构相关。北部地区拥有良好的地理位置优势,一方面毗邻北京,受首都经济辐射带动影响,经济发展优于南部地区;另一方面,北部水资源污染较轻且水资源丰富,南部地区则多以农业为主,水资源污染及短缺现象严重。多方因素使得南北部绿色水资源利用效率差距增大。

4.2 京津冀城市群绿色水资源利用效率的驱动因素

目前有关绿色发展的影响因素主要集中在经济发展水平、劳动力投入、技术创新水平、对外开放水平、产业结构、资源禀赋水平和能源投入水平等角度,辛龙等^[27]研究发现对外开放水平、经济发展、技术创新、能源强度及人力资本投入对区域绿色经济效率有显著促进作用;陈明华等^[26]从内源和外源角度对城市生态效率驱动因素进行了分析,发现经济发展和人口水平对城市生态效率驱动效果明显。绿色水资源利用效率作为区域绿色发展的重要组成部分,在驱动因素的选择上也应重点从人口规模、产业结构、自然资源条件、经济发展水平、城市开放程度和科技发展水平角度出发。在驱动效果上,由于研究区域不同,影响因素对不同地区水资源利用效率的作用效果存在差异^[1],但大体结论与前人研究相一致,即人口规模、产业结构、自然资源条件和经济发展水平是驱动城市群绿色水资源利用效率的主要影响因素,而城市开放程度和科技发展水平对京津冀绿色水资源利用效率的驱动效应相对较小。

5 结论

本文基于生态优化、绿色发展理念综合采用

Super-SBM模型测度京津冀城市群13个城市2008-2018年绿色水资源利用效率并对其时空差异进行分析,随后运用地理探测器模型探究绿色水资源利用效率驱动因素。研究表明:

(1)在研究期间内,京津冀城市群整体绿色水资源利用效率尚未达到有效状态,绿色水资源利用效率空间分布不均匀,北京市、天津市和河北省的绿色水资源利用效率均值的排序为北京市>天津市>河北省。京津冀13个城市的绿色水资源利用效率差距较大,绿色水资源利用效率最高的北京市均值高达1.316,而最低的邯郸市仅为0.429。

(2)从时空差异角度分析,京津冀城市群绿色水资源利用效率随时间呈现波动变化状态,且区域差异明显,北部地区以增大趋势为主,南部地区除衡水和石家庄两市绿色水资源利用效率出现显著下降外,其余地区稳定在较低水平,形成区域绿色水资源利用效率“北部>南部”的格局。

(3)因子探测结果表明人口规模、产业结构、自然资源条件和经济发展水平是驱动城市群绿色水资源利用效率的主要影响指标,而城市开放程度和科技发展水平对京津冀绿色水资源利用效率的驱动效应相对较小。通过研究各因素驱动效果时序演化特征发现,产业结构及人口规模驱动效应呈显著增大趋势,城市开放程度对绿色水资源利用效率的驱动力增幅较大但存在波动。自然资源条件、经济发展与科技发展水平的驱动效应出现下滑。

参考文献:

- [1] 任玉芬,苏小婉,贺玉晓,等.中国生态地理区城市水资源利用效率及影响因素[J].生态学报,2020,40(18):6459-6471.
- [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] 孙才志,马奇飞,赵良仕.基于SBM-Malmquist生产率指数模型的中国绿色水资源效率变动研究[J].资源科学,2018,40(5):993-1005.
- [4] 张凤,陈彦光,刘鹏.京津冀城镇体系与水系结构的时空关系研究[J].地理科学进展,2020,39(3):377-388.
- [5] 高媛媛,许新宜,王红瑞,等.中国水资源利用效率评估模型构建及应用[J].系统工程理论与实践,2013,33(3):776-784.
- [6] LI Xianguo, ZHANG Qian. AHP-based resources and environment efficiency evaluation index system construction about the west side of Taiwan Straits[J]. Annals of Operations Research, 2015, 228(1): 97-111.
- [7] DADABAEV T. Water resource management in Central A-

- sia: A Japanese attempt to promote water resource efficiency[J]. *Journal of Comparative Asian Development*, 2016, 15(1): 64-90.
- [8] KANEKO S, TANAKA K, TOYOTA T, et al. Water efficiency of agricultural production in China: Regional comparison from 1999 to 2002[J]. *International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology*, 2004, 3(3/4): 231-251.
- [9] 孙才志,姜坤,赵良仕. 中国绿色水资源效率测度及空间格局研究[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(12): 1999-2011.
- [10] 朱达,唐亮,谢启伟,等. 基于数据包络分析方法的城市水资源利用效率研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(6): 1956-1966.
- [11] AZAD M A S, ANCEV T, HERNANDEZ-SANCHO F. Efficient water use for sustainable irrigation industry[J]. *Water Resources Management*, 2015, 29(5): 1683-1696.
- [12] OULMANE A, ALI C, FRIJA A. The water use efficiency and its determinants in small horticultural farms in Algeria[J]. *SN Applied Sciences*, 2019, 1: 1238.
- [13] DENG Guangyao, LI Lu, SONG Yanan. Provincial water use efficiency measurement and factor analysis in China: Based on SBM-DEA model[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 69: 12-18.
- [14] 杨高升,谢秋皓. 长江经济带绿色水资源效率时空分异研究——基于SE-SBM与ML指数法[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(2): 349-358.
- [15] SHI Tiange, ZHANG Xiaolei, DU Hongru, et al. Urban water resource utilization efficiency in China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2015, 25(6): 684-697.
- [16] 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.
- [17] 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, 27(5): 27-36.
- [18] 张军,吴桂英,张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952-2000[J]. *经济研究*, 2004(10): 35-44.
- [19] 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): 157-164.
- [20] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009-2019.
- [21] 国家统计局. 中国城市统计年鉴 2009-2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [22] 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.
- [23] 徐承红,潘忠文. 区域绿色水资源效率提升的门槛效应——基于异质性环境规制的视角[J]. *吉林大学社会科学学报*, 2019, 59(6): 83-94+220-221.
- [24] 赵良仕,冷明祥,孙才志. 中国省际全要素水资源绿色效率及节水减排潜力分析[J]. *地域研究与开发*, 2021, 40(4): 123-128.
- [25] 马海良,丁元卿,王蕾. 绿色水资源利用效率的测度和收敛性分析[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(3): 406-417.
- [26] 陈明华,刘文斐,王山,等. 长江经济带城市生态效率的时空分异及其驱动因素[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(9): 121-127.
- [27] 辛龙,孙慧,王慧,等. 基于地理探测器的绿色经济效率时空分异及驱动力研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(9): 128-138.

