

DOI: 10.5846/stxb201801250198

海霞,李伟峰,王朝,周伟奇,韩立建,钱雨果.京津冀城市群用水效率及其与城市化水平的关系研究.生态学报,2018,38(12): - .

Hai X, Li W F, Wang Z, Zhou W Q, Han L J, Qian Y G. Interactions between water use efficiency and urbanization level in the Beijing-Tianjin-Hebei megaregion, China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): - .

京津冀城市群用水效率及其与城市化水平的关系研究

海霞^{1,2}, 李伟峰^{1,*}, 王朝^{1,2}, 周伟奇¹, 韩立建¹, 钱雨果¹

1 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 深入分析京津冀城市群用水效率与城市化水平的相互关系, 揭示不同城市城市化水平对水资源利用效率的影响, 有助于缓解水资源短缺问题。结合超效率数据包络模型, 定量分析了京津冀城市群不同行业的用水效率, 从人口、经济、社会与土地等不同城市化角度, 全面分析了城市发展水平与生活、工业、农业三大行业用水效率之间的相互关系。主要结论为: ①2006—2015年, 京津冀城市群生活和工业用水效率总体上略微下降, 而农业用水效率明显上升; 不同城市之间存在明显差别, 唐山、衡水与沧州市各行业用水效率均较高, 邯郸和邢台市各行业用水效率均偏低。②城市发展水平对不同行业用水效率的影响存在明显差异。城市化水平的提升可以显著提高生活用水效率, 但对工业和农业用水效率具有不同程度的负向影响。综合用水效率仅受到经济城市化的显著影响, 相关系数达 0.19, 表明提高用水效率的关键是进一步调整经济产业结构。③城市化水平与用水效率梯度的匹配状态较差。一方面, 京津冀 13 个城市中达到匹配的城市仅有 4 个, 占京津冀城市总数的 30.77%, 匹配程度较低。另一方面, 不存在城市化水平和用水效率双高型的城市, 匹配层次较低。综上所述, 针对京津冀城市化发展与用水效率的失衡关系, 应审视水资源投入产出结构并尝试行业联动等节水发展模式。

关键词: 京津冀城市群; 用水效率; 城市化水平; 超效率数据包络模型; 相关性分析

Interactions between water use efficiency and urbanization level in the Beijing-Tianjin-Hebei megaregion, China

HAI Xia^{1,2}, LI Weifeng^{1,*}, WANG Zhao^{1,2}, ZHOU Weiqi¹, HAN Lijian¹, QIAN Yuguo¹

1 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: To reveal the the contradictions between sustainable development and water availability, it is necessary to conduct in-depth analysis of the interactions between urbanization level and water use efficiency between cities in Beijing-Tianjin-Hebei megaregion (Jing-Jin-Ji megaregion). In this study, we took the Jing-Jin-Ji megaregion as a case and used the super efficiency data envelopment model to evaluate water use efficiency during the period of 2006—2015, and then explored the interactions between urbanization level and water use efficiency. The main results were: (1) from 2006 to 2015, the domestic and industrial water use efficiency decreased slightly, whereas the efficiency of agricultural water use increased significantly; There existed obvious difference on water use efficiency between cities, i.e., water use efficiency of all industries were high in Tangshan, Hengshui, and Cangzhou, but low in Xingtai and Handan; (2) the impacts of urbanization level on water use efficiency varied between cities. Urbanization development could significantly increased the domestic water use efficiency, while it had different extent of negative impacts on industrial and agricultural water use efficiency. The comprehensive water use efficiency was only significantly related with economic urbanization level ($R^2 = 0.$

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (41590841), 国家重点研发计划 (2017YFC0505701)

收稿日期: 2018-01-25; **修订日期:** 2018-04-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: li.wf@rcees.ac.cn

19), indicating that further adjustment of economic structure would be effective to improve water use efficiency; (3) overall, by the comparison of urbanization level and water use efficiency, most cities didn't match. There were only 4 matching cities, accounting for 30.77% of the numbers of cities in Jing-Jin-Ji megaregion. Moreover, there was no city with both high urbanization level and high water use efficiency, indicated that it was essential to improve the matching status. Regarding the unbalanced interactions between urbanization levels and water use efficiencies, more attention should be paid to promote the water use efficiency, such as optimize the input-output structure and explore some water saving development models.

Key Words: Beijing-Tianjin-Hebei megaregion; water use efficiency; urbanization level; super efficiency data envelopment model; correlation analysis

在经济全球化和信息全球化的大背景下,京津冀城市群城市化发展和一体化进程日渐加快。然而,快速的城市化加剧了该区水资源供需矛盾,南水北调工程极大地缓解了京津冀缺水危机,但是长期依靠客水的供水模式难以长期为继。为全面缓解京津冀城市群水资源供需矛盾,国家从十八大以来也陆续颁布了“用水效率三条红线”、《京津冀水资源协同发展规划》等“刚性约束”文件^[1-3]。目前,京津冀城市群内部用水效率良莠不齐,以 2015 年单位 GDP 用水量为例:北京和天津市单位 GDP 用水量仅分别为 12.47 m³/万元和 13.79 m³/万元,而衡水、邢台两市单位 GDP 用水量分别为 92.76 m³/万元和 126.06 m³/万元,远高于 89.03 m³/万元的全国平均水平,不同城市存在巨大鸿沟^[3]。因此,提高用水效率是缓解京津冀水资源供需矛盾乃至实现京津冀城市群可持续发展的必由之路。

京津冀城市群城市化发展水平与用水效率之间的相互关系尚不明确。截至 2015 年底,京津冀农业、工业和生活用水量之比为 63:14:23,然而一产、二产和三产 GDP 产值比分别为 11:44:45,各行业用水结构与其经济贡献之间严重失衡,用水效率差异是造成其失衡的核心根源之一。京津冀城市群用水效率如何? 城市化发展对用水效率有何影响? 探讨不同行业用水效率差异,阐明人口、经济、社会、土地城市化发展水平与生活、农业和工业用水效率的相互关系,有助于揭示京津冀城市化可持续发展与水资源短缺的激烈矛盾,为进一步优化京津冀城市发展布局和行业用水模式提供理论支撑。

随着全球城市化的不断推进,城市地区水资源供需矛盾日益突出,阻碍了城市化的可持续发展,因此近年来探究水资源系统与城市化系统之间相互关系的研究日渐丰富^[4]。首先,从城市化系统对水资源系统的胁迫方面,Fitzhugh 等人^[5]研究得出洛杉矶、纽约、亚特兰大等美国五大城市的城市化发展挤占了大量的生态用水。Cole 等人^[6]指出美国、日本等国家随着居民人均收入的增加用水量呈现大幅上升趋势。其次,从水资源系统对城市化系统的限制角度,吕素冰等人^[7]提出中原城市群随着城市用水需求的增长,水生态系统遭到破坏,用水效益也不断下降。王宇飞等人^[8]和李娜等人^[9]分别表明皖江经济带以及辽宁沿海经济带的水资源利用水平对城市化进程的约束有所降低。然而,由于水资源系统受自然界与人类活动的综合影响,单从水资源量角度评价城市化系统与水资源系统的相互关系并不准确^[10]。单纯地考虑水资源量管理并不能解决缺水问题,从根本上提高水资源利用效率才是解决水资源供需不平衡的有效途径^[11]。

在用水效率与城市化的相关研究中,一方面,孙才志^[12]、佟金萍^[13]、盖美^[10]等人分析了水资源利用效率的空间效应与区域差异,但没有深入研究区域经济发展水平对用水效率的影响。另一方面,陈素景^[14]、孙爱军^[15]等人分析了用水效率与经济关系的相互关系,但是对经济发展的理解较为单一,没有系统的研究城市发展的经济、人口、土地、社会等多方面因素对用水效率的联动效应。基于上述研究背景与进展,关于京津冀城市群水资源利用效率与城市化发展相互关系研究,当前存在的主要问题为:①以京津冀三地对象的研究居多,缺乏城市群尺度的不同行业用水效率的深入研究;②对于城市化的发展与各行业用水效率的联动作用,目前尚没有系统研究。

综上所述,本研究采用超效率模型,在定量评价京津冀城市群工业、农业和生活三大行业用水效率的基础

上,从人口、社会、经济、土地各个角度深入分析了京津冀城市化发展与用水效率的相互联动和匹配效应,以期优化区域城市发展布局及提高用水效率提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

京津冀城市群包括北京、天津两个直辖市和河北全境 11 市(包括石家庄市、唐山市、秦皇岛市、保定市、廊坊市、沧州市、衡水市、邢台市、邯郸市、张家口市、承德市),位于我国环渤海经济圈腹地,也处于我国八大流域中水资源最为贫瘠的海河流域,人均水资源量不足 $500 \text{ m}^3/\text{人}$ ^[16]。截至 2015 年底,全区常住人口 1.11 亿人,常住人口城市化率 56.52%,人均 GDP 达 5.09 万元/人,是我国典型的人多水少,且自然资源和社会经济双重缺水型区域。

本研究以 2005、2010 与 2015 年为例,分析了京津冀城市群用水效率及其与城市化发展水平的相互影响。数据来源为 2005—2015 年《北京市水资源公报》、《天津市水资源公报》、《河北省水资源公报》以及 2006—2016 年《中国城市统计年鉴》、《北京市统计年鉴》、《天津市统计年鉴》、《河北省统计年鉴》及河北省各地级市统计年鉴等。

2 研究方法

2.1 用水效率评价指标体系及其评价方法

“用水效率”,即水资源生产活动在既定产出的情况下所需的相对最少资源投入量^[13]。目前,运用较为广泛的用水效率评价方法有随机前沿分析法和数据包络法。这两种方法分别由 Farrell^[17]、Charnes A^[18] 提出,可以将水资源与相关的社会经济生产要素结合起来,并能够从投入产出角度全面的衡量水资源利用状况。其中,数据包络模型基于线性优化理论,规避了多元非线性参数设定导致的评价结果误差,更易于揭示系统内部的相互关系,因此更适用于不同区域的比较分析^[19]。

首先,用水效率的投入指标层面,主要包括资源投入、劳动力投入和资本投入三大组成(表 1)。水资源是京津冀居民生活以及工业、农业、服务业生产的不竭源泉,劳动力即各行业从业人员是完成各项生产活动的基本载体,资本投入是各产业从业人员是劳动生产率提高和经济增长的有力保障。其次,为全面评价用水效率,对生活、工业和农业生产用水指标体系,还分别选取了教育支出、科技支出、农业机械化水平等典型投入要素,选取依据为:①京津冀城市群不同城市教育资源投入水平和教育质量差异较大,北京和天津是全区乃至全国重要的人才培养基地,河北省教育资源相对较少,因此选取教育支出指标可以反映居民文化素质差异对家庭生活用水效率的影响。②由于工业化发展水平的差异,京津冀不同城市在工业生产过程中科技投入力度也差异较大,北京、唐山、天津等市工业化进程相对较快,因此科技支出可以表征科技投入差异对不同城市工业节水的促进作用差异^[2]。③由于京津冀城市群不同城市农业经济占比差异较大,比如保定、石家庄等粮食生产基地的农业机械耕种、收割规模远高于其他工业或服务业为主导的城市。因此农业机械化水平差异可以充分体现农田水利发展对不同城市农业用水效率的提升差异^[1]。最后,产出指标层面,经济产出是用水活动的最直接绩效,因此选取各行业 GDP 产值^[20-21]。

基于以上指标体系,本研究采用规模报酬不变(CRS)假设下的超效率数据包络模型(SE-DEA 模型)计算京津冀城市群不同行业的用水效率,具体计算过程由 DEA-SOLVER Pro 5.0 软件实现。数据包络模型(data envelopment analysis model,简称 DEA 模型)是基于线性规划理论评价多个决策单元(DMU)相对效率的非参数方法^[17]。它以多个投入产出值构造的生产前沿面为基础,将处于前沿面以上的决策单元称为 DMU 效率有效(效率值 θ 为 1),反之则无效(效率值 $\theta < 1$)。

由于传统 DEA 模型无法为多个效率为 1 的 DMU 进行效率排序,Andersen 等^[22] 提出超效率模型(SE-DEA)模型,具体如公式(1)所示。

表 1 京津冀城市群用水效率评价投入产出指标体系

Table 1 Input-output index system of water efficiency evaluation of Jing-Jin-Ji megaregion

用水结构 Structures of Water use	资源投入 Resources input	劳动力投入 Laborers input	资本投入 Capitals input	产出 output
生活用水 Domestic water use	生活用水量 (10^8 m^3)	三产从业人员 (10^4 人)	教育支出 (10^4 元) 三产固定资产投资额 (10^8 元)	第三行业产值 (10^8 元)
工业用水 Industrial water use	工业用水量 (10^8 m^3)	二产从业人员 (10^4 人)	二产固定资产投资额 (10^8 元) 科技支出 (10^4 元)	第二行业产值 (10^8 元)
农业用水 Agricultural water use	农业用水量 (10^8 m^3) 有效灌溉面积 (km^2) 农业机械化水平 (km^2)	一产从业人员 (10^4 人)	一产固定资产投资额 (10^8 元)	第一行业产值 (10^8 元)
综合用水 Comprehensive water use	综合用水效率 = $1/3$ (生活用水效率 + 工业用水效率 + 农业用水效率)			

生活用水量包括居民家庭生活用水量和服务业用水量。农业机械化水平由机耕面积、机播面积、机收面积综合表征,权重分别为 0.4、0.3 和 0.3。

$$\begin{aligned}
 & \min \theta_o^s \\
 & s.t. \\
 & \theta_o^s x_{io} \geq \sum_n \lambda_j x_{ij}, i = 1, 2, \dots, m \\
 & y_{ro} \leq \sum_n \lambda_j y_{rj}, r = 1, 2, \dots, s \\
 & \lambda_j \geq 0, j \neq o
 \end{aligned} \quad (1)$$

式中, x 为投入向量, y 为产出向量, j 代表决策单元, o 代表待评价决策单元, n 为决策单元的个数, i 代表投入要素, m 代表投入要素总个数, r 代表产出要素, s 代表产出要素总个数, λ 为权重变量, θ ($0 < \theta \leq 1$) 表示决策单元的效率值。

2.2 城市化水平评价指标体系及其测度方法

城市化不仅仅是人口的集聚化过程,还包括土地的集约高效利用、社会经济的快速发展和人们生活方式的改变^[23]。京津冀城市群作为我国社会、经济、政治、文化的重要腹地,具有综合发展水平较高,发展速度较快和发展水平差异较大的特点。北京、天津两地是全区人口、科技、交通等要素凝聚和膨胀的极核,吸引了大量的产业和资本,而河北省 11 个城市经济增长相对落后,且不同城市呈现出不同的城市化发展模式。如石家庄、保定、唐山市是重要的工业和农业基地,张家口和承德地区旅游业较为发达,工业发展相对缓慢,沧州、秦皇岛等沿海城市服务业增长较快。综上所述,本研究针对京津冀城市群城市化发展高水平、快节奏、多层次的特点,从人口、社会、土地和经济 4 个方面综合测度京津冀城市群的城市化水平^[23-24]。指标体系中不仅从城市化规模和农转非程度考虑各类指标的典型性,也兼顾其他对用水效率有较大影响的指标,如教育支出、城镇居民人均消费支出等(表 2)。

本研究主要运用熵权法计算各类城市化率。针对每一个评价指标,为了充分表征京津冀不同城市之间的差异波动对城市化综合水平的影响,本研究采用了熵权法^[24],对各类城市化指标赋权,主要步骤如下:

1) 建立原始矩阵: $X = (X_{ij})_{m \times n}$, 其中, X_{ij} 为变量原始值,代表第 i 类城市化水平的第 j 个指标的数值, m 为城市化类型数, r 为每类城市化水平的指标数。 $i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, r$ 。

2) 数据无量纲化:为解决各指标不同量纲导致的无法直接汇总问题,本研究运用极差标准化得分法对各

指标 X_{ij} 逐一进行消纲,公式如下:

表 2 京津冀城市群城市化水平评价指标体系
Table 2 Evaluation index system of urbanization level of Jing-Jin-Ji megaregion

目标层 Target layers	指标层 Indicator layers	权重 Weights	指标方向 Index directions
人口城市化水平 Population urbanization level	城镇人口比例(%)	0.37	+
	城镇人口数量(10^4 人)	0.63	+
社会城市化水平 Social urbanization level	全社会消费品零售总额(10^8 元)	0.32	+
	教育支出(10^4 元)	0.2	+
土地城市化水平 Land urbanization level	城镇居民人均消费支出(元/人)	0.48	+
	建设用地面积(km^2)	0.49	+
	人均建设用地面积($\text{km}^2/\text{人}$)	0.51	+
经济城市化水平 Economic urbanization level	二产比例(%)	0.38	+
	三产比例(%)	0.42	+
	人均 GDP(元/人)	0.2	+
综合城市化水平 Comprehensive urbanization level	人口城市化率	0.26	+
	社会城市化率	0.23	+
	土地城市化率	0.27	+
	经济城市化率	0.24	+

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_{ij})}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})} \quad (2)$$

式中, $Z(X_{ij})$ 为变量 X_{ij} 标准化后值, $S(X_{ij})$ 为样本标准差。

3) 计算各评价指标的权重 W_{ij} 。

4) 计算各类城市化率 A_i :

$$A_i = \sum_{j=1}^r Z(X_{ij}) W_{ij} \quad (3)$$

5) 计算综合城市化率 S : 先计算各类城市化率权重 W_{Ai} ,其次对各类城市化率加权求和:

$$S = \sum_{i=1}^m A_i W_{Ai} \quad (4)$$

2.3 城市化与用水效率的相关性分析方法

为探究京津冀城市化发展与用水效率的相互影响,本研究运用 Pearson 相关分析法计算了各类城市化水平与各行业用水效率的相关系数。Pearson 相关分析的原理为:

$$P_c = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{N \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (5)$$

式中, P_c 为相关性系数,为 N 样本个数, x 和 y 分别对应两组变量的数据序列, P_c 值越大, x 和 y 相关性越强。

2.4 城市化水平与用水效率的匹配程度分析方法

为进一步明确京津冀城市群内部不同城市的用水效率与城市化发展的关系,本研究结合 Z-score 标准化的思路将京津冀生活、工业以及农业用水三类用水效率依次分为 A(相对高效型)、B(较高型)、C(相对低效型)3 个梯度,并将京津冀人口、经济、社会 and 土地四类城市化水平依次分为 I(偏高型)、II(居中型)、III(偏低型)3 个梯度,并观察用水效率梯度与城市化水平梯度是否相互匹配(城市化水平和用水效率均相对较高视为高层次匹配,两者均相对居中视为中度匹配,两者均相对最低的情况视为低层次匹配,其他情况视为不匹配)。具体步骤如下:

(1) 城市化水平和用水效率原始数据的 Z-Score 标准化

分别建立城市化和用水效率的原始矩阵: $X_U = (X_{ij})_{m \times r}$ 和 $X_W = (X_{ip})_{m \times q}$,其中, X_{ij} 为城市化水平的原始

值,代表第 i 类城市的第 j 种城市化水平的数值, m 为城市数, r 为城市化水平类型数。 $i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$ 。 X_{ip} 为用水效率的原始值,代表第 i 个城市的第 p 类用水类型的效率, q 为用水效率类型数, $p = 1, 2, \dots, q$ 。

$$Z(X_{ij}) = \frac{X_{ij} - \bar{X}_{ij}}{S(X_{ij})} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_{ij}}{\sqrt{\frac{(X_{ij} - \bar{X}_{ij})^2}{n}}} \quad (6)$$

$$Z(X_{ip}) = \frac{X_{ip} - \bar{X}_{ip}}{S(X_{ip})} = \frac{X_{ip} - \bar{X}_{ip}}{\sqrt{\frac{(X_{ip} - \bar{X}_{ip})^2}{n'}}} \quad (7)$$

式中, $Z(X_{ij})$ 和 $Z(X_{ip})$ 分别为城市化水平和用水效率的标准化后值, $\bar{X}_{ij}$ 和 $\bar{X}_{ip}$ 分别为城市化水平和用水效率的均值, $S(X_{ij})$ 和 $S(X_{ip})$ 分别为城市化水平和用水效率的样本标准差。 n 和 n' 分别为城市化水平和用水效率数据矩阵的样本容量。

(2) 用水效率梯度划分

分别针对生活、农业和工业三大行业用水,依据 Z-score 正态分布标准化后的数据分布情况,可将京津冀 13 个城市大致分为以下 3 种用水效率水平梯度,分别为高效型(A 型,3 种用水效率标准化值均大于 0,数值符号为“+”),中效型(B 型,3 种用水效率值正负混合,数值符号为“+”或“-”)和低效型(C 型,3 种用水效率值均小于 0,数值符号为“-”)(表 3)。

根据划分结果得,京津冀城市群内部,唐山、沧州和衡水市整体用水效率较高,属于 A(高效)型综合、生活、工业和农业用水效率均为正值,高于全区平均水平。其次,北京、天津等 8 个城市属于 B(中效)型,不同行业用水效率水平参差不齐。最后,邢台和邯郸市属于 C(低效)型梯度城市,用水效率整体偏低,体现在综合、生活、工业和农业用水效率均相对落后。

表 3 2006—2015 年京津冀城市群用水效率水平梯度

Table 3 Pattern gradient of water use efficiency level In Jing-Jin-Ji megaregion, 2006—2015

效率梯度类型 Types of water use efficiency gradient	城市名称 City name	生活用水效率 Domestic water use efficiency	工业用水效率 Industrial water use efficiency	农业用水效率 Agricultural water use efficiency	综合用水效率 Comprehensive water use efficiency
A(高效)型 Type A(high efficiency)	唐山	0.82	0.19	0.86	1.08
	沧州	0.67	1.36	0.05	1.23
	衡水	0.71	0.63	0.62	1.08
B(中效)型 Type B(middle efficiency)	北京	1.18	-0.91	-1.04	0.10
	天津	1.02	0.84	-1.68	0.36
	石家庄	0.17	0.55	-0.05	-0.45
	秦皇岛	0.61	-1.50	0.73	-0.07
	保定	-0.90	0.56	-0.14	-0.19
	张家口	-0.94	-1.42	0.75	-1.12
	承德	-1.33	-0.09	0.59	-0.67
	廊坊	-0.43	0.67	0.49	0.42
C(低效)型 Type C(low efficiency)	邢台	-0.94	-0.10	-0.07	-0.71
	邯郸	-0.64	-0.19	-0.71	-1.03

(3) 城市化水平梯度划分

如表 4 所示,综合考虑人口、土地、社会与经济四要素,依据 Z-score 正态分布标准化后的数据分布情况,可将京津冀 13 个城市大致分为以下 3 种综合城市化水平梯度,分别为城市化水平偏高型(I 型,五类城市化

水平标准化值均大于 0,符号为“+”),城市化水平居中型(Ⅱ型,五类城市化水平标准化值混合分布,符号为“+”或“-”)和城市化水平偏低型(Ⅲ型,五类城市化水平标准化值均小于 0,符号为“-”)

根据分类结果可知,首先,北京和天津市属于人口、经济等五类城市化水平均偏高的Ⅰ型城市,综合城市化水平分别为 2.76 和 1.44。其次,石家庄、唐山和秦皇岛市城市化水平次之,属于Ⅱ型,城市化水平相对居中。最后,邯郸、邢台、衡水等其他 8 个城市各类城市化水平相对最低,整体上城市化水平均低于Ⅰ型和Ⅱ型城市。

表 4 2006—2015 年京津冀城市群城市化水平梯度
Table 4 Pattern gradient of urbanization level in Jing-Jin-Ji megaregion, 2006—2015

城市化梯度类型 Types of urbanization level	城市名称 City name	人口城市化水平 Population urbanization level	经济城市化水平 Economic urbanization level	社会城市化水平 Social Urbanization level	土地城市化水平 Land urbanization level	综合城市化水平 Comprehensive urbanization level
Ⅰ(偏高)型 Type I (high)	北京市	2.60	2.48	2.69	2.81	2.74
	天津市	1.62	1.42	1.35	1.35	1.46
Ⅱ(居中)型 Type II (middle)	石家庄市	0.19	-0.04	0.58	-0.13	0.16
	唐山市	-0.17	0.59	-0.10	0.09	0.04
	秦皇岛市	-0.47	0.09	-0.37	-0.13	-0.25
Ⅲ(偏低)型 Type III (low)	邯郸市	-0.17	-0.49	-0.47	-0.47	-0.41
	邢台市	-0.33	-0.92	-0.59	-0.59	-0.58
	保定市	-0.50	-0.71	-0.17	-0.44	-0.43
	张家口市	-0.57	-0.54	-0.64	-0.42	-0.54
	承德市	-0.78	-0.63	-0.65	-0.22	-0.55
	沧州市	-0.23	-0.21	-0.56	-0.68	-0.49
	廊坊市	-0.57	-0.24	-0.34	-0.54	-0.45
	衡水市	-0.62	-0.80	-0.72	-0.64	-0.69

3 研究结果与分析

3.1 用水效率时空变化特征

3.1.1 综合用水效率时空变化特征

总的来说,2006—2015 年间京津冀城市群综合用水效率呈现上涨趋势,年均增长 1.25%。从空间分布特征来看,唐山、沧州和衡水市综合用水效率较高,年均综合用水效率分别为 0.90、0.90 和 0.91,邯郸、张家口市年均综合用水效率较低,均不足 0.70;从时间变化趋势来看,综合用水效率增长最快的依次为天津、廊坊和承德市,年均增长率均高于 3.50%,下降较明显的城市为唐山市,年均下降 1.04%(图 1)。

3.1.2 生活用水效率时空变化特征

总体上,京津冀城市群生活用水效率随着时间的推移略有下降,由 2006 年的 0.76 下降至 2015 年的 0.72,年均下降 0.44%。从空间分布特征来看,生活用水效率总体较高的城市为北京、唐山和天津市,年均生活用水效率分别为 0.95、0.91 和 0.90;从时间变化特征来看,天津、衡水和廊坊市生活用水效率提高较快,年均增长分别为 4.55%、5.48%、6.52%,天津市生活用水效率提升主要得益于第三行业从业人员和第三行业固定资产投资的投入相对减少和合理化,而衡水和廊坊市提升效率的关键是生活用水量冗余的逐年降低。秦皇岛市生活用水效率下降明显,由 2006 年的 1.17 下降至 2015 年的 0.82,年均下降 5.58%,主要原因为第三行业从业人员和教育支出的过快增长,从而产生了大量投入冗余(图 2)。

3.1.3 工业用水效率时空变化特征

如图 3 所示,2006—2015 年,京津冀城市群整体工业用水效率也呈整体下降趋势,年均下降 0.22%。从空间分布特征来看,年均用水效率水平较高的城市为沧州、保定、衡水、廊坊和天津市,年均用水效率均高于 0。

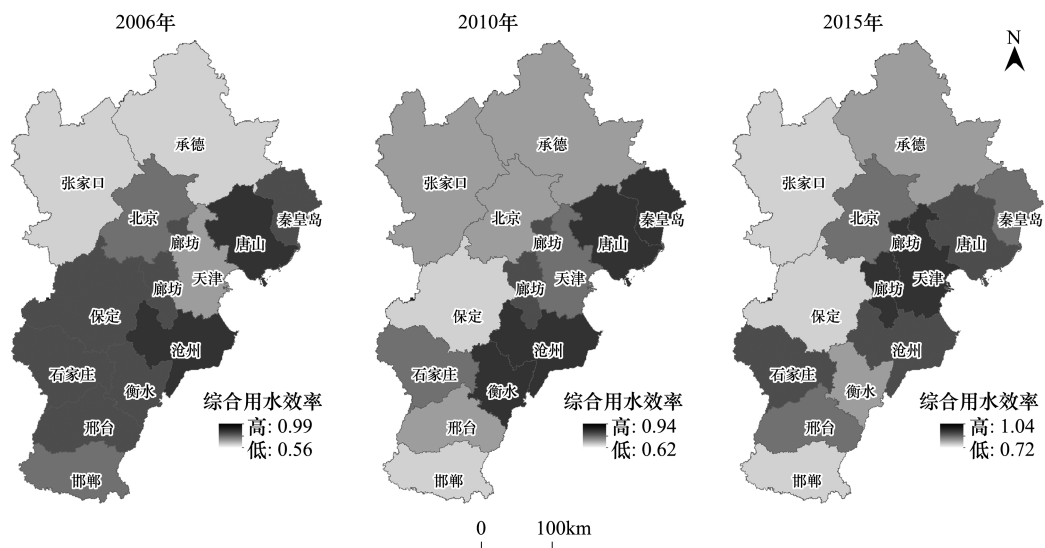


图 1 2006—2015 年京津冀城市群综合用水效率时空变化特征

Fig.1 Spatiotemporal characteristics of comprehensive water use efficiency in Jing-Jin-Ji megaregion, 2006 to 2015

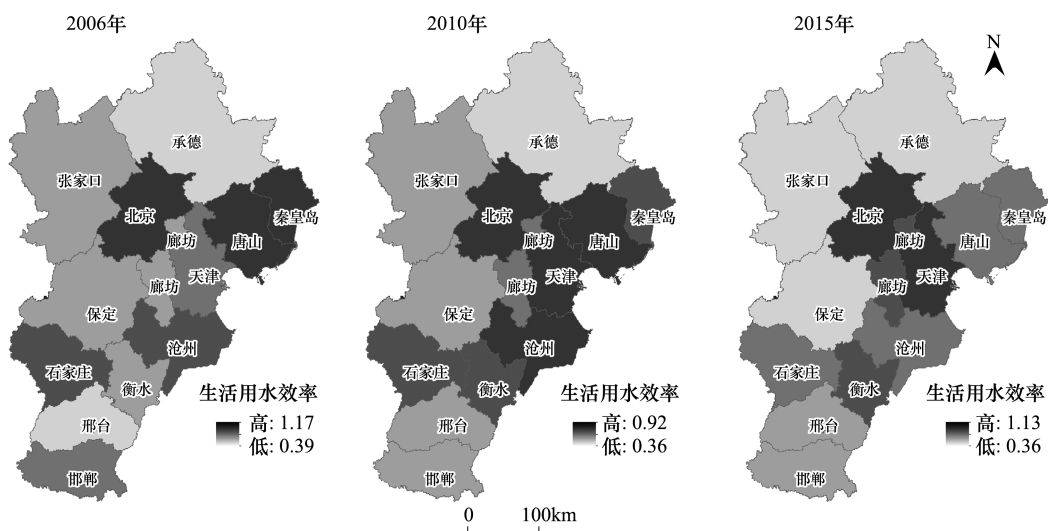


图 2 2006—2015 年京津冀城市群生活用水效率时空变化特征

Fig.2 Spatiotemporal characteristics of domestic water use efficiency in Jing-Jin-Ji megaregion, 2006 to 2015

90,年均用水效率最低的城市为秦皇岛和张家口市,年均用水效率值均不足 0.60;从时间变化特征来看,其中保定、衡水等 4 个城市用水效率逐年下降,而天津市工业用水效率增长趋势明显,年均增长率 3.37%,主要得益于工业用水量的合理控制和第二行业从业人员数量的相对下降。

3.1.4 农业用水效率时空变化特征

如图 4 所示,2006 年至 2015 年,京津冀农业用水效率提高较快,平均农业用水效率值由 0.60 提高至 0.93,年均增长率达 3.66%。从空间分布特征来看,农业用水效率最高的城市为秦皇岛和唐山市,北京和天津市农业用水效率最低;从时间变化特征来看,北京和衡水市农业用水效率略有下降外,其余城市农业用水效率水平平均呈快速增长趋势。其中,秦皇岛市增长幅度最大,年均增长率达 10.14%,从投入产出冗余角度分析可知,秦皇岛市近年来农业用水量快速缩减,且农业用地面积和化肥施用量也相应的快速减少,投入冗余大幅下降,而产出相对不变,因此用水效率提高。

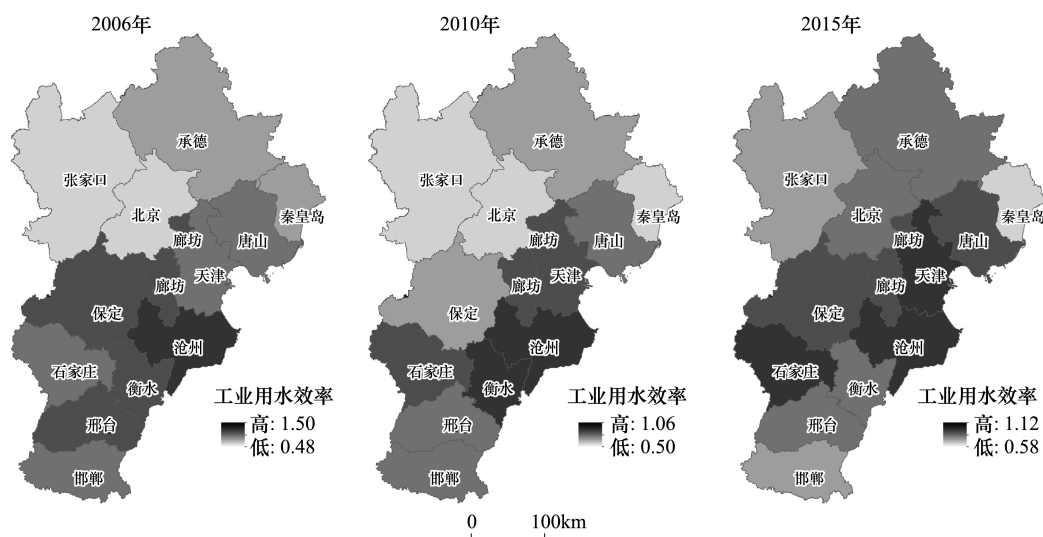


图3 2006—2015年京津冀城市群工业用水效率时空变化特征

Fig.3 Spatiotemporal characteristics of industrial water use efficiency in Jing-Jin-Ji megaregion, 2006 to 2015

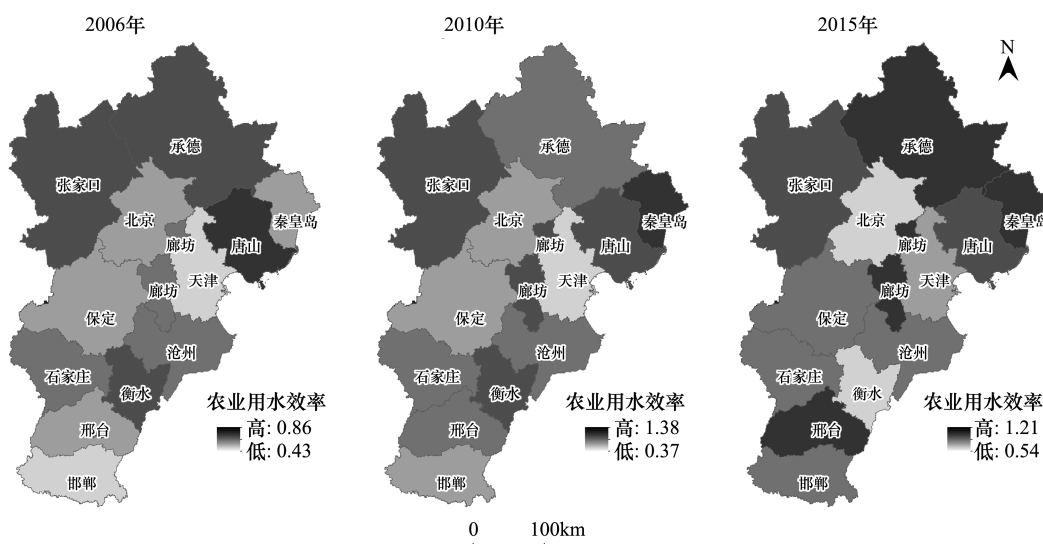


图4 2006—2015年京津冀城市群农业用水效率时空变化特征

Fig.4 Spatiotemporal characteristics of agricultural water use efficiency in Jing-Jin-Ji megaregion, 2006 to 2015

3.2 用水效率与城市化的相互关系

3.2.1 Pearson 相关性分析结果

总体上,京津冀城市群用水效率与城市化发展水平密切相关,但是,城市化发展水平对不同行业用水效率的联动影响明显不同(表5)。

一方面,生活用水效率与城市化水平呈现显著正相关关系,而工业和农业用水效率与城市化水平呈负相关关系。结果表明,京津冀城市群城市化水平的提升有助于生活用水效率的提高,而对工业和农业用水效率的提高反而是负面影响。原因分析如下:①城市化的发展提高了生活用水效率,从投入角度,生活用水量投入的大幅降低,表明近年来京津冀城市发展过程中再生水回用、节水器具改造、阶梯水价制度实施等生活节水工作的成效十分显著^[25-26]。②人口和土地城市化与农业用水效率负相关,相关系数均为-0.40,表明人口与土地城市化的提升会引起农村劳动力的减少以及建设用地对农用土地的侵占,进而可能会而对农业用水效率产生负向影响^[27]。③工业用水效率仅与土地城市化水平显著负相关,表明土地城市化水平的提高拓展了京津

冀工业生产规模,工业资本、劳动力等生产资料投入大幅增加,从而出现投入冗余的局面,工业用水效率下降。

另一方面,京津冀综合用水效率仅与经济城市化水平呈显著相关性,相关系数为 0.19,表明京津冀用水效率的变化根本上是受到经济城市化的带动和影响,因此为提高全区用水效率,还需要进一步调整和优化行业结构^[28]。

表 5 京津冀城市群用水效率与城市化水平的相关性分析结果

Table 5 Analysis of the correlation between urbanization and water efficiency in Jing-Jin-Ji megaregion

用水效率类型 Types of water use efficiency	城市化水平类型 Types of urbanization level				
	人口城市化水平 Population urbanization level	经济城市化水平 Economic urbanization level	社会城市化水平 Social urbanization level	土地城市化水平 Land urbanization level	综合城市化水平 Comprehensive urbanization level
生活用水效率 Life water use efficiency	0.42 **	0.55 **	0.40 **	0.42 **	0.45 **
农业用水效率 Agricultural water use efficiency	-0.40 **	-0.22 *	-0.32 **	-0.40 **	-0.36 **
工业用水效率 Industrial water use efficiency	-0.04	-0.07	-0.03	-0.19 *	-0.09
综合用水效率 Comprehensive water use efficiency	0.01	0.19 *	0.05	-0.08	0.02

** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关, * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关

3.2.2 匹配状态分析结果

总体上,京津冀城市群不同城市的城市化水平梯度与用水效率梯度的匹配状态较差。京津冀城市群内部 13 个城市中,仅有石家庄、秦皇岛、邯郸、邢台 4 个城市达到城市化水平和用水效率相对匹配,达到匹配的城市占京津冀城市总数的 30.77%,匹配程度较低。京津冀不存在城市化水平和用水效率均较高的 A I 匹配型城市,因此京津冀城市化水平和用水效率的匹配层次较低(表 6)。

在城市化水平和用水效率匹配的城市中:第一、石家庄和秦皇岛城市化水平和用水效率均居中,属于 B II 匹配型城市,城市化水平和用水效率均有待提高。第二、邯郸和邢台市城市化水平相对较低,用水效率也落后于其他城市,属于 C III 匹配型城市,匹配状态最不理想。从区位布局来看,邯郸和邢台市位于京津冀最南端,远离北京、天津、唐山等经济高速发展的城市,因此交通、信息相对封闭,科技创新和交流水平较弱,不利于经济发展,也阻碍了用水效率的提高^[2,29]。

在城市化水平和用水效率梯度不匹配的城市中:第一:北京和天津市城市化水平最高,但是城市化水平居中,因此京津冀不存在城市化水平和用水效率均较高的 A I 匹配型城市。究其原因,虽然京、津两市具有良好的科技资源,具有较高的节水技术^[25],但北京市农业和工业用水过程中劳动力和水资源量投入较多,从而投入产出不合理造成效率较低,而天津市由于农业用水量和用地面积较大也导致农业用水效率较低。第二:唐山、衡水、承德等 7 个城市城市化水平梯度居中或偏低,但是这些城市的城市化水平梯度均高于用水效率梯度,说明城市化水平高低并不是用水效率优劣的决定性因素,在经济发展相对较慢的地区,资源开发力度、劳动力聚集密度和资本投入力度也相对较低,因此浪费和冗余现象也较少,即合理的投入产出规模配置才是实现高效用水的关键^[29-30]。

表 6 京津冀城市群用水效率与城市化水平梯度的匹配状态

Table 6 Matching status of urban water use efficiency and urbanization gradient in Jing-Jin-Ji megaregion

城市化水平梯度 Gradient of urbanization level	用水效率梯度 Gradient of water use efficiency		
	A(高效)型 Type A (high efficiency)	B(中效)型 Type B (middle efficiency)	C(低效)型 Type C (low efficiency)
I(偏高)型 Type I (high)	无	北京、天津	无
II(居中)型 Type II (middle)	唐山	石家庄、秦皇岛	无
III(偏低)型 Type III (low)	衡水、沧州	承德、张家口、廊坊、保定	邯郸、邢台

4 结论

本研究以我国超大城市群京津冀为例,全面分析了城市化发展水平与用水效率的联动影响。主要结论如下:

(1) 京津冀城市群不同城市以及不同行业的用水效率差异较大。

从京津冀城市群整体水平上看,生活和工业用水效率略有下降,农业用水效率大幅提升,年均增长 3.36%。从城市群内部的空间分布看,除了唐山、沧州和衡水市各行业用水效率均较高,而邯郸、邢台市各行业用水效率均较低之外,其他多数城市不同行业用水效率差异较大,其中,北京和唐山市具有较高的生活用水效率,沧州、保定、衡水、廊坊和天津市工业用水效率突出,秦皇岛和唐山市农业用水效率高于其他城市。

(2) 京津冀城市化发展水平与用水效率存在密切的联动作用。

总体上,综合用水效率仅与经济城市化具有显著正相关关系,表明经济行业结构的调整对用水效率有明显影响;不同行业之间用水效率与城市化的关系差异较大,其中,生活用水效率与人口、社会、经济及土地城市化水平均呈显著正相关,农业用水效率与人口、经济等各类城市化水平负相关,工业用水效率仅与土地城市化水平负相关,揭示了土地城市化促进了工业规模的扩张并导致了工业生产资料的冗余现象。

(3) 京津冀城市群不同城市的城市化发展水平与用水效率梯度的匹配状态较差。

城市化水平梯度与用水效率梯度的匹配状态仍需改善。京津冀城市群达到匹配的城市仅占京津冀城市总数的 30.77%,匹配程度较低;而且不存在城市化水平和用水效率均较高的 A I 组合,匹配层次较低。据不同城市化水平与用水效率的匹配现状研究,今后的京津冀协作发展应在合理分配水资源以及其他生产资料的基础上,加快科技创新和交流,积极尝试“区域复合关联”、“集群产业链”等新型节水模式^[29,31-32]。

本研究已初步明晰了京津冀用水效率特征以及城市化发展对用水效率的总体影响规律,但要揭示影响用水效率的关键因素,还需要进一步开展因子分析,明确不同因子对不同行业用水效率的影响程度,进而为不同行业用水效率的进一步提高提供科学明确的指导。

参考文献 (References):

- [1] 赵姜, 孟鹤, 龚晶. 京津冀地区农业全要素用水效率及影响因素分析. 中国农业大学学报, 2017, 22(3): 76-84.
- [2] 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. 干旱区资源与环境, 2016, 30(7): 1-7.
- [3] 鲍超, 贺东梅. 京津冀城市群水资源开发利用的时空特征与政策启示. 地理科学进展, 2017, 36(1): 58-67.
- [4] 方创琳, 孙心亮. 河西走廊水资源变化与城市化过程的耦合效应分析. 资源科学, 2005, 27(2): 2-9.
- [5] Fitzhugh T W, Richter B D. Quenching urban thirst: growing cities and their impacts on freshwater ecosystems. BioScience, 2004, 54(8): 741-754.
- [6] Cole M A. Economic growth and water use. Applied Economics Letters, 2004, 11(1): 1-4.
- [7] 吕素冰, 马钰其, 冶金祥, 李庆云. 中原城市群城市化与水资源利用量化关系研究. 灌溉排水学报, 2016, 35(11): 7-12.
- [8] 王宇飞, 盖美, 耿雅冬. 辽宁沿海经济带水资源短缺风险评价. 地域研究与开发, 2013, 32(2): 96-102.
- [9] 李娜. 辽宁沿海经济带城市化与水资源交互耦合关系研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2011.
- [10] 盖美, 王宇飞, 马国栋, 郝慧娟. 辽宁沿海地区用水效率与经济的耦合协调发展评价. 自然资源学报, 2013, 28(12): 2081-2094.
- [11] Allan T. Productive efficiency and allocative efficiency: why better water management may not solve the problem. Agricultural water management, 1999, 40(1): 71-75.
- [12] 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. 资源科学, 2009, 31(10): 1696-1703.
- [13] 佟金萍, 马剑锋, 王圣, 秦腾, 王倩. 长江流域农业用水效率研究: 基于超效率 DEA 和 Tobit 模型. 长江流域资源与环境, 2015, 24(4): 603-608.
- [14] 陈素景, 孙根年, 韩亚芬, 李琦. 中国省际经济发展与水资源利用效率分析. 统计与决策, 2007, (22): 65-67.
- [15] 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. 资源科学, 2008, 30(3): 446-453.
- [16] 刘登伟. 京津冀大都市圈水资源短缺风险评价. 水利发展研究, 2010, 10(01): 20-24.
- [17] Farrell M J. The measurement of productive efficiency. Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General), 1957, 120(3): 253-290.

- [18] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 1978, 2(6): 429-444.
- [19] 陈金晓. 超效率数据包络分析模型与评价方法的改进研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [20] 任俊霖, 李浩, 伍新木, 李雪松. 长江经济带省会城市用水效率分析. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(5): 101-107.
- [21] 张义敏, 蔡旭东, 陈雅芬, 马程晨. 基于 DEA 的水资源利用效率评价及节水潜力分析. *人民珠江*, 2015, 36(6): 121-124.
- [22] Andersen P, Petersen N C. A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis. *Management Science*, 1993, 39(10): 1261-1264.
- [23] 杨坤矗, 毕润成, 孙然好, 陈利顶. 京津冀地区城市化发展时空差异特征. *生态学报*, 2017, 37(12): 3998-4007.
- [24] 何仁伟, 谢磊, 孙威. 京津冀城市群城市化质量综合评价研究. *地域研究与开发*, 2016, 35(6): 42-47.
- [25] 张秀智. 京津冀等七大城市群节约用水和再生水利用状况比较分析. *给水排水*, 2017, 53(7): 39-48.
- [26] 尚毅梓, 赵勇, 石红旺, 王丽婷, 王建华. 天津市行业用水变化与归因分析. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(1): 153-157, 192-192.
- [27] 姚学慧, 张雄, 李增嘉, 廖允成, 山仑. 北方灌区节水农业发展若干问题探讨. *农业工程科学*, 2005, 21(9): 403-406.
- [28] 鲍超, 方创琳. 城市化与水资源开发利用的互动机理及调控模式. *城市发展研究*, 2010, 17(12): 19-23, 65-65.
- [29] 谭佳音, 蒋大奎. 群链产业合作模式下“京津冀”区域水资源优化配置研究. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(4): 160-166.
- [30] 王余丁, 刘艳菊, 宗义湘, 杨泽源. 唐山市城市化发展模式研究. *中国软科学*, 2011, (S1): 136-143.
- [31] 范文宇. 京津唐经济区复合系统关联关系研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2006.
- [32] 封志明, 刘登伟. 京津冀地区水资源供需平衡及其水资源承载力. *自然资源学报*, 2006, 21(5): 689-699.