

引用格式:彭辉,徐佩琦,邵玲,等.京津冀地区水-能系统关联及协同效益[J].资源科学,2022,44(11):2330-2340.[Peng H, Xu P Q, Shao L, et al. Water-energy nexus and co-benefits in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Resources Science, 2022, 44(11): 2330-2340.] DOI: 10.18402/resci.2022.11.13

# 京津冀地区水-能系统关联及协同效益

彭辉<sup>1,2</sup>,徐佩琦<sup>1</sup>,邵玲<sup>1</sup>,潘云龙<sup>1</sup>,何国嘉<sup>1</sup>,郭曼丽<sup>1</sup>,伍梓<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学(北京)经济管理学院,北京 100083;2. 北京交通大学经济管理学院,北京 100044;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:**京津冀各地的水资源与能源通过区域内外产业链形成了复杂的相互依赖关系,分析该地区的水-能系统关联有助于制定资源协同管理政策和实现区域可持续发展。本文基于多区域投入产出模型对京津冀地区水-能系统关联及其驱动因素进行了分析,并在此基础上核算了水-能协同节约效益。结果表明:①京津冀各地能源部门与水资源的完全关联均远大于直接关联。其中北京市能源部门由于从中国其他地区调入了大量高耗水产品,从直接关联最低一跃成为完全关联最高。②京津冀各地水部门与能源的完全关联均大于直接关联。其中北京市由于循环利用了大量的再生水,在三地中直接关联最大;河北省由于本地其他部门的用水效率较低,在三地中完全关联最大。③京津冀地区能部门对水和水部门对能完全关联在2012—2017年间均有所下降,其中前者的主要驱动因素是中国(除京津冀)地区的技术变动效应和生产结构变动效应,而后者则是由各地自身和中国(除京津冀)地区的技术变动效应和生产结构变动效应共同驱动的。④京津冀地区取得了良好的水-能协同效益,但2017年相对2012年收益有所下降。随着水/能生产部门用能/用水效率的快速提升,京津冀地区未来的水-能协同效益可能继续下降。

**关键词:**虚拟水;隐含能;水-能系统关联;直接关联;完全关联;多区域投入产出模型;京津冀地区

DOI: 10.18402/resci.2022.11.13

## 1 引言

京津冀地区是继“珠三角”和“长三角”之后中国第三个经济增长极,也是中国北方经济发展核心区域<sup>[1,2]</sup>。随着“京津冀协同发展战略”的不断推进,地区社会经济快速发展,正在逐步成为一个有机整体。京、津、冀三地发展程度不同,各种自然资源的先天禀赋和使用结构也有所不同。因此,研究不同自然资源间的互动机制,在保障不同资源安全稳定供应及统一协调管理的前提下实现优势互补、互利共赢对于京津冀地区的生态环境保护与区域可持续发展有重要意义。

水资源和能源是人类生存和社会经济发展不

可或缺的战略性自然资源;二者相互依赖,形成了紧密的关联关系。例如水资源的开采、处理和输送需要能源作为动力支撑,能源的生产转化也需要水资源的投入。受到最终需求和对外贸易驱动,水资源和能源隐藏在产品和服务中发生着频繁流动,学界将其分别称为“虚拟水”<sup>[3,4]</sup>和“隐含能”<sup>[5]</sup>。除上述直接关联(即水/能在生产供应过程中直接使用的能源/水资源)外,水或能源相关部门也通过产业链间接使用能源或水资源(间接关联),由此引发的水-能系统关联(直接关联与间接关联之和)成为了相关研究领域的热点和难点问题。

目前已有众多学者采用多种定量方法分析了

收稿日期:2021-08-17;修订日期:2022-10-12

基金项目:国家重点研发计划项目课题(2021YFC3200402);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项目(sklhse-2021-B-05);北京市社会科学基金项目(16LJC013)。

作者简介:彭辉,男,河南信阳人,硕士生,研究方向为产业经济学。E-mail: penghui0625@163.com

通讯作者:邵玲,女,新疆巴州人,副教授,研究方向为资源经济学。E-mail: shaoling@cugb.edu.cn

2022年11月

国家、区域、城市的水-能系统关联关系,包括可计算一般均衡模型<sup>[6]</sup>,系统动力学模型<sup>[7]</sup>和投入产出方法<sup>[8-10]</sup>等。如关伟等<sup>[11]</sup>借助能源水足迹评价模型测算了中国30个省(市、区)化石能源和电力生产生命周期水足迹,发现全国1/3的地区存在能-水不匹配问题。Chen等<sup>[12]</sup>以北京市为例,利用投入产出模型和生态网络方法分析了能源和水资源关系网络的结构特性和动态演变,发现服务业使用了最多的隐含能源,而制造业使用了更多的虚拟用水。Li等<sup>[13]</sup>运用投入产出模型从生产和消费两个方面分析了北京、天津以及河北11个城市的水资源和能源的关联关系,发现北京、天津和唐山的能源用水量和水生产用能量都较大。水资源和能源通过产业链引发的复杂系统关联关系除了跨越产业边界,还可能跨越地理边界<sup>[14-16]</sup>。现有研究多采用单区域投入产出模型或忽略了与区外贸易交流的多区域投入产出模型,没有将国外进口和中国其他地区调入产品的虚拟水和隐含能考虑在内,因此得到的结果局限在区域范畴内。

分解分析作为研究事物变化影响因素的一种分析框架,近年来在社会经济研究中得到越来越多的应用<sup>[17,18]</sup>。常见的分解方法有结构分解分析(Structural Decomposition Analysis, SDA)与指数分解分析(Index Decomposition Analysis, IDA),其中SDA方法可与投入产出分析有效结合,对包括技术变动、生产结构变动等在内的影响因素展开分析,被广泛用于资源环境领域相关研究中<sup>[19,20]</sup>。在当前产业分工日益细化和区域间贸易往来日益紧密的大背景下,京津冀地区的水资源和能源通过各个地区的各个产业部门形成了复杂的系统关联关系,有必要对其变化背后的驱动因素进行分解分析。本文拟链接世界各国多区域投入产出表和中国省域多区域投入产出表,建立世界-中国-京津冀投入产出表,在核算京津冀地区能源/水资源部门直接和隐含用水/用能的基础上,分析京津冀3个地区水-能的系统关联及其完全关联变化的驱动因素,并评估节水/节能政策带来的节能/节水协同效益,从而为京津冀区域水-能协同发展政策的制定提供参考。

## 2 研究方法 with 数据来源

### 2.1 研究方法

#### 2.1.1 多区域投入产出模型

多区域投入产出模型<sup>[21-23]</sup>能够全面和系统地描述多个区域产业部门间的经济联系和分析伴随经济流的资源环境隐含流,近年来得到了广泛的应用。根据Leontief的需求模型<sup>[24]</sup>,由最终需求驱动的资源使用量 $R$ 为:

$$R = FLY = \varepsilon Y \quad (1)$$

式中: $F = [F^1 \ \cdots \ F^s \ \cdots \ F^m]$ 表示资源的直接使用系数,即各区域各部门生产单位产品或服务过程中直接使用的资源量, $F^s$ 表示 $s$ 区域各部门的资源直接使用系数向量: $F^s = [f_1^s \ \cdots \ f_j^s \ \cdots \ f_n^s]$ ;  $L$ 表示Leontief逆矩阵,表征各区域各部门对其他部门的完全需求系数,即该部门每提供一个单位最终产品需要完全需求(直接和间接需求之和)其他部门

$$\text{的产品或服务总量, } L = \begin{bmatrix} L^{11} & \cdots & L^{1s} & \cdots & L^{1m} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ L^{r1} & \cdots & L^{rs} & \cdots & L^{rm} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ L^{m1} & \cdots & L^{ms} & \cdots & L^{mm} \end{bmatrix},$$

$$\text{其中 } L^{rs} = \begin{bmatrix} L_{11}^{rs} & \cdots & L_{1j}^{rs} & \cdots & L_{1n}^{rs} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ L_{i1}^{rs} & \cdots & L_{ij}^{rs} & \cdots & L_{in}^{rs} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ L_{n1}^{rs} & \cdots & L_{nj}^{rs} & \cdots & L_{nn}^{rs} \end{bmatrix}, \text{任一元素 } L_{ij}^{rs} \text{ 表}$$

示 $s$ 区域 $j$ 部门对 $r$ 区域 $i$ 部门的完全需求系数; $Y = [Y^1 \ \cdots \ Y^s \ \cdots \ Y^m]^T$ ,表示各区域各部门的最终需求向量,其中 $Y^s = [Y_1^s \ \cdots \ Y_j^s \ \cdots \ Y_n^s]^T$ ,表示 $s$ 区域各部门的最终需求向量; $\varepsilon = FL = [\varepsilon^1 \ \cdots \ \varepsilon^s \ \cdots \ \varepsilon^m]$ 被称作资源使用乘数,表征各区域各部门每单位最终需求产品引发的直接和间接资源需求总和(在相关研究中也称为各部门的体现、隐含或虚拟资源使用强度<sup>[22]</sup>)。其中 $\varepsilon^s$ 表示 $s$ 区域各部门的资源使用强度向量。

参照经济投入产出方法相关定义,本文研究的水-能系统关联指能/水部门生产单位产出(能产品/水产品)需要使用的水资源/能源,其中直接关联( $N_{\text{direct}}$ )指直接用水/用能(参照直接使用系数),完全关联( $N_{\text{complete}}$ )指直接和间接使用的虚拟水资源/隐含

能源之和(参照完全需求系数)。相关系数计算公式如下:

$$N_{\text{direct}} = \frac{R_{W,E}^d}{X_{E,W}} = F_{W,E} \quad (2)$$

$$N_{\text{complete}} = \frac{R_{W,E}^c}{X_{E,W}} = \varepsilon_{W,E} \quad (3)$$

式中:  $R_{W,E}^d$  为各地能/水部门在生产过程中直接用水/用能;  $R_{W,E}^c$  为各地能/水部门通过产业链引发的全部虚拟水资源(完全用水)/隐含能源使用(完全用能);  $X_{E,W}$  为该能/水部门的总产出。直接联系系数在数值上等于能/水部门的直接用水/用能系数( $F_{W,E}$ , 也称为能部门对水直接关联/水部门对能直接关联), 而完全联系系数在数值上等于能/水部门的虚拟用水/隐含用能强度( $\varepsilon_{W,E}$ , 也称为能部门对水完全关联/水部门对能完全关联)。

各地的能/水部门通过区域内产业链间接使用的隐含能源/虚拟水资源同时由本地和其他区域供应。本文首次将能部门对水和水部门对能完全联系系数分别拆分为来自不同区域、通过不同区域产业链引发的系数之和:

$$\varepsilon_W^s = F_W \times L_{*E}^{*s} = F_W^1 \times L_{*E}^{1s} + \dots + F_W^r \times L_{*E}^{rs} + \dots + F_W^m \times L_{*E}^{ms} \quad (4)$$

$$\varepsilon_E^s = F_E \times L_{*W}^{*s} = F_E^1 \times L_{*W}^{1s} + \dots + F_E^r \times L_{*W}^{rs} + \dots + F_E^m \times L_{*W}^{ms} \quad (5)$$

式中: \*代表所有行/列;  $F_W^r = [F_{1,W}^r \dots F_{j,W}^r \dots F_{n,W}^r]$ , 表示  $r$  区域各部门的直接用水系数向量;  $L_{*E}^{rs} = [L_{1E}^{rs} \dots L_{jE}^{rs} \dots L_{nE}^{rs}]^T$ , 表征  $s$  区域能源部门对  $r$  区域各部门的完全需求系数;  $F_E^r = [F_{1,E}^r \dots F_{j,E}^r \dots F_{n,E}^r]$ , 表示  $r$  区域各部门的直接用能系数向量;  $L_{*W}^{rs} = [L_{1W}^{rs} \dots L_{jW}^{rs} \dots L_{nW}^{rs}]^T$ , 表征  $s$  区域水资源部门对  $r$  区域各部门的完全需求系数。由此, 各区域能/水部门的完全联系系数可以拆分为  $m$  个系数之和, 其中每个系数代表该能/水部门为生产单位产品需要完全使用的  $r$  区域虚拟水资源/隐含能源总量。

### 2.1.2 结构分解模型

本文采用两极分解法<sup>[25]</sup>将能/水部门的完全联系系数变化进一步分解为不同区域的技术变动效应(Technology Change, TC)和生产结构变动效应

(Structural Change, SC), 分解过程如下(为简便起见, 文中只给出能源部门的公式, 水部门公式同理可得):

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_W^s &= \frac{1}{2}(\Delta F)(L_{*E, t0}^{*s} + L_{*E, t1}^{*s}) + \frac{1}{2}(F_{t0} + F_{t1})(\Delta L_{*E}^{*s}) \\ &= \left[ \underbrace{\frac{1}{2}(\Delta F^1)(L_{*E, t0}^{1s} + L_{*E, t1}^{1s})}_{\text{区域1的技术变动效应}} + \underbrace{\frac{1}{2}(F_{t0}^1 + F_{t1}^1)(\Delta L_{*E}^{1s})}_{\text{区域1的生产结构变动效应}} \right] \\ &\quad + \dots + \left[ \underbrace{\frac{1}{2}(\Delta F^r)(L_{*E, t0}^{rs} + L_{*E, t1}^{rs})}_{\text{区域r的技术变动效应}} + \underbrace{\frac{1}{2}(F_{t0}^r + F_{t1}^r)(\Delta L_{*E}^{rs})}_{\text{区域r的生产结构变动效应}} \right] \\ &\quad + \dots + \left[ \underbrace{\frac{1}{2}(\Delta F^m)(L_{*E, t0}^{ms} + L_{*E, t1}^{ms})}_{\text{区域m的技术变动效应}} + \underbrace{\frac{1}{2}(F_{t0}^m + F_{t1}^m)(\Delta L_{*E}^{ms})}_{\text{区域m的生产结构变动效应}} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $\Delta \varepsilon_W^s$  表示  $s$  区域能源部门的完全联系系数变化量;  $\Delta F$  表示  $s$  区域能源部门生产单位产品需要直接使用的各区域水资源变化量;  $\Delta L_{*E}^{*s}$  表示  $s$  区域能源部门对各区域各部门的完全需求系数变化量;  $t0$  指第一期,  $t1$  指第二期。

### 2.1.3 协同效益测算

能产品/水产品在生产过程中会引发水资源/能源的使用, 由于避免了相应能源产品或水产品的生产, 各地在生产实践中节约的能源或水资源也会带来水资源或能源的协同节约收益, 本文将其定义为水-能协同效益( $B_{W,E}$ )。直接协同效益( $B_{W,E}^{\text{direct}}$ )和完全协同效益( $B_{W,E}^{\text{complete}}$ )可分别表示为:

$$B_{W,E}^{\text{direct}} = F_{W,E} \times Q_{W,E} \quad (7)$$

$$B_{W,E}^{\text{complete}} = \varepsilon_{W,E} \times Q_{W,E} \quad (8)$$

式中:  $Q_{W,E}$  表示由于节约的水资源或能源带来的水/能部门总产出的减少量。

### 2.2 数据来源

受数据可得性限制, 本文将研究年份设定为2017年, 另外计算了2012年的结果用于分解分析。根据式(1), 开展多区域投入产出模拟需要3类基础数据。第一类为经济投入产出数据, 本文首先链接了中国碳核算数据库(CEADs)发布的中国多区域投入产出表和EXIOBASE数据库发布的世界多区域投入产出表, 并对该表进行了合并, 最终形成了北京、天津、河北、中国(不包含京津冀地区)、世界(不包含中国)5个区域的多区域投入产出表。其中中国的4个区域各自包括42个部门, 世界区域包括



2022年11月

200个部门。第二类是各区域各产业部门的直接水资源使用清单。由于第三产业部门用水数据的缺失,本文只考虑了农业用水和工业用水。其中京津冀地区的数据来自于各地的水务局、水资源公报、统计年鉴和经济普查年鉴,中国(不包含京津冀地区)和世界(不包含中国)的数据来源于EXIOBASE数据库(统计口径均为各部门的取水总量,故具备可比性)。第三类数据是各区域各产业部门的直接能源使用清单,其中中国各区域的数据来自于中国碳核算数据库(CEADs),世界数据来自EXIOBASE数据库。

根据京津冀地区投入产出数据中的部门划分,煤炭采选产品业,石油和天然气开采产品业,电力、热力的生产和供应业以及燃气生产和供应业部门与能源生产和供应有关。由于个别地区部分产业产值过低、不具备可比性(如北京市的焦炭产量、原油产量和煤气产量以及天津市的原煤产量和煤气产量均为0),且电力、热力的生产和供应业在现在以及可预测的未来都是最重要的能源生产部门,故选取该部门展开分析。水的生产与供应业则被选取为水部门。最后,水-能协同效益的计算需要京津冀各地的节水量和节能量数据,其中节约用水量来自中国住房和城乡建设部的年鉴数据。节约用能量按照京津冀各地单位GDP(可比价)能耗强度的下降幅度计算,即首先假设研究年份与上一年能耗水平相当,计算出未采取节能措施情景下的理论能源使用量,将其与当年实际能源使用量的差值作为能源节约量。

### 3 结果与分析

#### 3.1 能源部门与水资源系统关联

能源生产过程中需要直接使用大量的水资源,即本文提出的能部门对水直接关联(图1)。2017年北京市电力、热力的生产和供应业部门与水资源直接关联(直接用水强度)最小( $2.32 \text{ m}^3/\text{万元}$ ),天津市与河北省分别是  $7.89 \text{ m}^3/\text{万元}$  和  $12.29 \text{ m}^3/\text{万元}$ 。这主要是因为北京市电力、热力的生产和供应业部门广泛采用了高效节水技术,取得了良好的成效<sup>[26]</sup>。尽管如此,电力、热力的生产和供应业仍然是北京市直接用水最多的工业部门(占2017年工业用水的

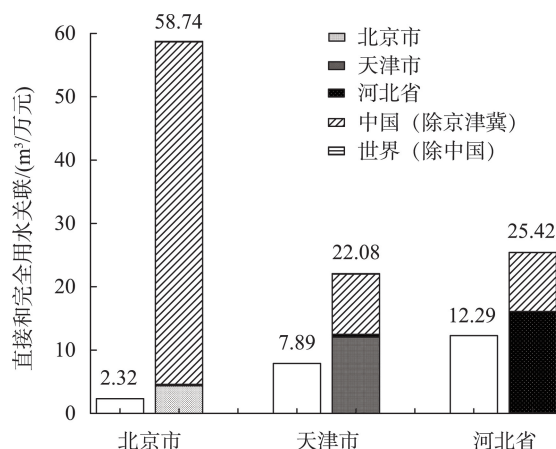


图1 2017年京津冀地区电力、热力的生产和供应业直接用水和完全用水关联(左侧为直接关联,右侧为完全关联)

Figure 1 Direct and complete water nexus of the production and supply of electric power, steam, and hot water in the Beijing-Tianjin-Hebei region in 2017 (the left column refers to the direct nexus, and the right column refers to the complete nexus)

27.59%)。考虑到北京市电力行业主要的发电方式仍为火力发电(占2017年总发电量的95.99%)<sup>[27]</sup>,通过发展可再生能源发电技术以及普及高效冷却水技术,北京市该部门的直接用水强度有望更低。

由于产业间存在复杂的相互依赖关系,能源生产通过产业链引发了大量的虚拟用水,即本文提出的能部门对水完全关联(图1)。2017年北京市电力、热力的生产和供应部门与水资源完全关联(虚拟用水强度)最大( $58.74 \text{ m}^3/\text{万元}$ ),其次为河北省( $25.42 \text{ m}^3/\text{万元}$ )和天津市( $22.08 \text{ m}^3/\text{万元}$ )。三地能部门对水的完全关联均大于直接关联,其中北京市电力、热力的生产和供应业每万元产出虚拟用水为直接用水的25.35倍,天津市为2.80倍,河北省为2.07倍。北京市从能部门对水直接关联最低一跃成为(能部门对水)完全关联最高,反映出能源生产与水资源系统关联的复杂性。

根据式(4),北京市电力、热力的生产和供应部门与水资源的完全关联系数可以拆分为来自本地、天津市、河北省、中国(除京津冀)和世界(除中国)5个部分;其中北京市本地产业链引发的强度只有  $4.36 \text{ m}^3/\text{万元}$ ,而中国(除京津冀)地区的贡献高达  $54.06 \text{ m}^3/\text{万元}$ (占比92.04%)。北京市电力行业主要采用火力发电方式,且北京市本地基本不生产煤炭,因此极度依赖中国(除京津冀)地区的煤炭等一

次能源,而这些高耗水能源产品的调入拉高了北京市电力部门的虚拟用水强度。北京市未来可考虑从丰水地区以及用水效率较高的地区调入电力以及高耗水能源产品,以绿色采购的方式推进中国电力和其他能源主要生产地区的节水技术改进以及全国的节水实践。天津市电力、热力的生产和供应业虚拟用水强度中本地和中国(除京津冀)占比分别为54.42%和43.02%,对中国(除京津冀)地区依赖同样很高。河北省电力、热力的生产和供应业虚拟用水主要来自本地(63.04%),也有相当一部分虚拟水从中国(除京津冀)调入(36.57%)。由此可以看出,区域外完全关联是京津冀各地、尤其是北京市能部门对水完全关联非常重要的组成部分。然而,以往的研究并未考虑到这一点,得到的结果局限在区域范畴内,难以精确地刻画出京津冀地区的水-能系统关联关系。

### 3.2 水资源部门与能源系统关联

水资源的开采、处理和输送需要能源作为动力直接驱动,即本文提出的水部门对能直接关联(图2)。2017年京津冀地区水的生产和供应业与能源直接关联(直接用能强度)最大的地区是北京市(5.70 GJ/万元),其次为河北省(5.28 GJ/万元)和天津市(2.26 GJ/万元)。污水的深度净化处理以及后

续的再生水回输利用也是水生产和供应的重要组成部分,耗能相对新鲜水开采和输送更高。北京市的再生水利用率比津冀两地高出很多(2017年北京市政再生水利用量占污水处理总量的60.64%,而天津市和河北省仅为28.24%和24.77%)<sup>[28]</sup>,由此也造成北京市水生产部门直接用能强度较大。水的生产和供应业作为天津市直接用能强度较低的工业部门,则是通过调整生产工艺,在输水、产水、水处理各环节打出“双碳”组合拳,走出了一条可推广的节能降耗低碳之路<sup>[29]</sup>。在地区协同发展过程中,水资源生产过程使用直接能源最少的天津市可以帮助河北省通过政策引导和改进生产工艺来节约能源使用。

水资源在生产供应过程中除了直接使用能源外,也会通过产业链造成隐含能源使用(即完全关联)。从图2可以看到,与能部门对水类似,2017年京津冀三地水部门对能的完全关联均大于直接关联,其中河北省水的生产和供应业隐含用能强度最大(13.83 GJ/万元),其次为北京市(9.89 GJ/万元)和天津市(8.60 GJ/万元)。天津市和北京市水生产部门的隐含用能强度均低于中国(除京津冀)平均和世界(除中国)平均强度,而河北省则高于后两者。这说明京津地区水生产部门的完全用能效率高于中国其他地区和世界其他国家的平均水平,而河北省水生产部门的完全用能效率还有待提高。值得注意的是,不同于直接关联,北京市水部门对能的完全关联并未比天津市高出太多,甚至只有河北省的71.51%。鉴于京津冀三地水的生产供应对中国(除京津冀)和世界(除中国)的依赖程度差别不大(后两者贡献的强度值分别为3.36 GJ/万元、3.32 GJ/万元和3.04 GJ/万元),这一变化主要是由于北京市本地其他产业贡献的间接用能较低(即北京市完全用能强度与直接用能强度之差;京津冀三地分别为4.20 GJ/万元、6.34 GJ/万元和8.55 GJ/万元)。由此可见,北京市其他产业的用能效率相对于津冀两地的其他产业要高。

不同于能源部门对区域外虚拟水依赖较大,京津冀地区水的生产和供应通过本地产业链引发的隐含能源使用占比最大,这主要是因为水资源主要由本地供应,有较强的地域性,因此使用的本地能

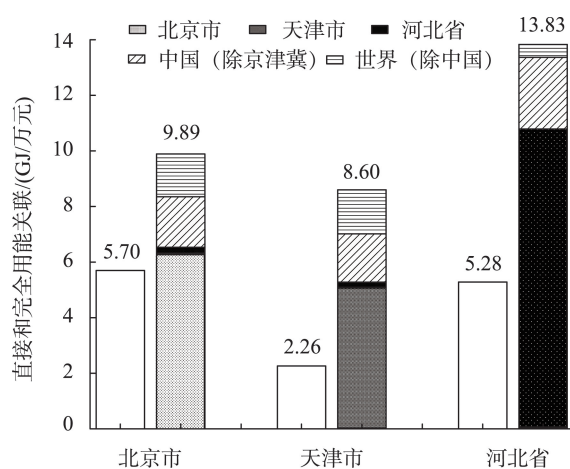


图2 2017年京津冀地区水的生产和供应业直接用能和完全用能关联(左侧为直接关联,右侧为完全关联)

Figure 2 Direct and complete energy nexus of the production and supply of tap water in the Beijing-Tianjin-Hebei region in 2017 (the left column refers to the direct nexus, and the right column refers to the complete nexus)

2022年11月

源也较多。分地区来看,北京市水的生产和供应业每万元产出 63.34% 的隐含用能来自本地,21.07% 的隐含用能来自中国其他地区,15.59% 的隐含用能来自世界其他国家和地区。天津市和北京市情况类似,水的生产和供应业每万元产出 58.86% 的隐含用能来自本地,22.75% 和 18.39% 分别来源于中国其他地区和世界其他国家。河北省作为资源大省,本地能源供应充足,水的生产和供应业每万元产出隐含用能绝大部分来自本地(77.54%)。需要注意的是,京津两地水生产部门通过世界其他国家产业链引发的隐含用能占比比能源生产部门对进口虚拟用水占比要高(北京市分别为 15.59% 和 0.12%,天津市分别为 18.39% 和 0.40%),这主要因为能源产品相对水产品更为方便运输,因此区域属性更弱一些,从而导致水生产部门对国际隐含能源的依赖性更高。

### 3.3 水-能完全关联变化的结构分解

根据式(6),京津冀地区水-能完全关联变化由北京、天津、河北、中国(除京津冀地区)、世界(除中国)5个区域的技术变动效应和生产结构变动效应共同驱动(本文简称为  $TC_b, TC_t, TC_h, TC_c, TC_w; SC_b, SC_t, SC_h, SC_c, SC_w$ )。2017年,京津冀地区电力、热力的生产和供应部门虚拟用水强度(能部门对水完全关联)相比2012年普遍有所下降,其中北京市相比2012年下降了40.71%,天津市下降了57.13%,河北

省下降了54.07%。由图3可见,京津冀地区电力、热力的生产和供应业虚拟用水强度下降主要由中国(除京津冀)地区的技术变动效应和生产结构变动效应驱动。其中技术变动效应促使北京市电力、热力的生产和供应业虚拟用水强度下降32.87  $m^3$ /万元(占比33.18%),天津市下降6.88  $m^3$ /万元(占比13.36%),河北省下降6.46  $m^3$ /万元(占比11.67%),生产结构变动效应促使北京市电力、热力的生产和供应业虚拟用水强度下降3.70  $m^3$ /万元(占比3.74%),天津市下降15.81  $m^3$ /万元(占比30.70%),河北省下降10.69  $m^3$ /万元(占比19.31%)。这主要是因为京津冀地区虚拟用水的主要来源是中国(除京津冀)地区,而中国(除京津冀)地区电力、热力的生产和供应业虚拟用水强度相较于2012年下降了39.01%(83.69  $m^3$ /万元),再加上京津冀地区从中国(除京津冀)地区调入产品的结构更加优化,共同驱动了各地区电力、热力的生产和供应业的虚拟用水强度的下降。

2017年京津冀地区水资源生产部门隐含用能强度(水部门对能完全关联)相较于2012年也都有所降低,天津市下降最多(47.71%),其次为北京市(30.28%)和河北省(24.47%)。本文同样分解了京津冀地区水的生产和供应业隐含用能强度变化,结果如图4。总体来看,京津冀地区水的生产和供应

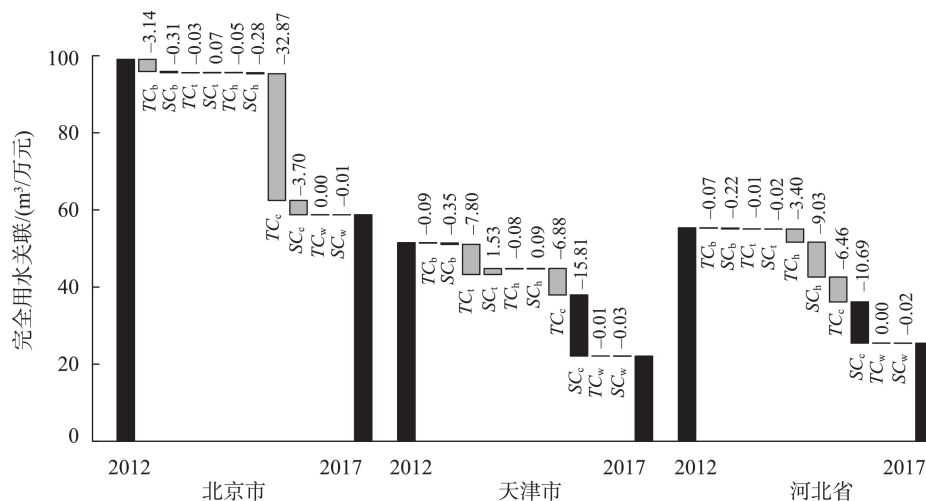


图3 2012—2017年不同区域技术和结构效应对京津冀地区电力、热力的生产和供应业完全用水关联下降的贡献

Figure 3 Contribution of regional technological and structural effects on the complete water nexus changes of the production and supply of electric power, steam, and hot water in the Beijing-Tianjin-Hebei region, 2012-2017



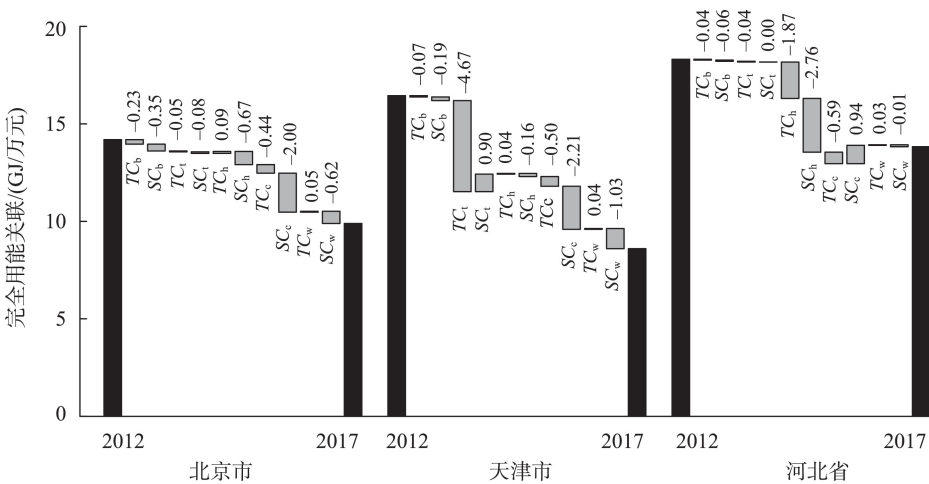


图4 2012—2017年不同区域技术和结构效应对京津冀地区水的生产和供应业完全用能关联下降驱动的贡献

Figure 4 Contribution of regional technological and structural effects on the complete energy nexus changes of the production and supply of tap water in the Beijing-Tianjin-Hebei region, 2012-2017

业隐含用能强度下降的主要原因是本地和中国(除京津冀)的技术变动效应和生产结构变动效应。北京市水的生产和供应业隐含用能强度下降的主要原因是河北省、中国(除京津冀)、世界(除中国)地区的生产结构变动效应,分别促使其隐含用能强度下降0.67 GJ/万元(占比4.76%),2.00 GJ/万元(占比14.10%)和0.62 GJ/万元(占比4.40%)。天津市水资源生产部门隐含用能强度下降的主要原因是天津市本地的技术变动效应和中国(除京津冀)、世界(除中国)地区的生产结构变动效应,分别促使其隐含用能强度下降4.67 GJ/万元(占比28.40%),2.21 GJ/万元(占比13.42%)和1.03 GJ/万元(占比6.28%)。2017年河北省水的生产和供应业隐含用能强度下

降的主要原因是本地的技术变动效应和生产结构变动效应,分别促使其隐含用能强度下降1.87 GJ/万元(占比10.19%)和2.76 GJ/万元(占比15.06%)。

3.4 水-能协同效益

近年来,京津冀地区通过绿色技术创新提升清洁生产水平,在节水和节能领域取得了良好收益,由此也带来了能源与水资源的协同节约收益。表1展示了京津冀地区由于节水/节能给能/水部门带来的协同效益。2017年京津冀地区通过提高水资源的重复利用率和扩大节水措施的投资总额,共节约用水6044.00万m<sup>3</sup>。由于避免了这部分水产品的生产,水生产与供应业的直接能耗量(协同)减少了159.55 TJ,隐含能耗量(协同)减少了387.20 TJ。

表1 2012年和2017年京津冀地区水-能协同效益

Table 1 Water-energy co-benefits in the Beijing-Tianjin-Hebei region, 2012 and 2017

		2012年				2017年			
		北京市	天津市	河北省	京津冀地区	北京市	天津市	河北省	京津冀地区
节水带来的 (额外)节能	直接能源/TJ	124.35	6.74	661.55	792.64	35.29	0.35	123.91	159.55
	占比/%	15.69	0.85	83.46	100.00	22.12	0.22	77.66	100.00
	隐含能源/TJ	314.56	22.15	1698.55	2035.26	61.28	1.33	324.59	387.20
	占比/%	15.46	1.08	83.46	100.00	15.83	0.34	83.83	100.00
节能带来的 (额外)节水	直接用水/万m <sup>3</sup>	51.59	89.54	788.99	930.12	24.18	177.54	1096.88	1298.60
	占比/%	5.55	9.62	84.83	100.00	1.86	13.67	84.47	100.00
	虚拟用水/万m <sup>3</sup>	1229.13	688.03	3374.56	5291.72	516.93	693.30	2757.49	3967.72
	占比/%	23.23	13.00	63.77	100.00	13.03	17.47	69.50	100.00

2022年11月

2017年京津冀地区节约能源5027.66 TJ,由此带来能源生产部门直接用水量协同减少1298.60万 $\text{m}^3$ ,虚拟用水量协同减少3967.72万 $\text{m}^3$ 。

分地区来看,2017年京津冀地区水-能直接协同效益和完全效益中河北省占比最大,节约直接能源和直接用水占比为77.66%和84.47%,节约隐含能源和虚拟用水占比为83.83%和69.50%。这是因为河北省作为工业大省,水资源使用量和能源消费量远大于京津地区,在总节水和节能中占比也最大(85.57%和64.10%),与此同时河北省产业技术落后于京津两地,共同作用使得水-能协同发展可提升空间更大。北京市和天津市水-能直接协同效益和完全效益占比较少,其中北京市节约直接能源和直接用水占比为22.12%和1.86%,节约隐含能源和虚拟用水占比为15.83%和13.03%;天津市节约直接能源和直接用水占比为0.22%和13.67%,节约隐含能源和虚拟用水占比为0.34%和17.47%。

总体来看,京津冀地区2017年水-能协同效益相对2012年有所下降。2017年京津冀地区节约用水量相较于2012年降低了75.86%,叠加水的生产和供应业完全用能关联的降低(京津冀三地分别降低30.28%,47.71%和24.47%),使得协同直接和隐含节能量在此期间分别下降了79.87%和80.98%。2017年京津冀地区节能相较于2012年增加了32.56%,虽然产生的协同直接节水效益相对2012年增长了39.62%,但协同虚拟用水效益却降低了25.02%。这主要是因为京津冀地区能源部门的完全用水强度在此期间下降很快(京津冀三地分别下降40.71%,57.13%和54.07%),且幅度远大于直接用水强度的下降。长远来看,随着技术的不断进步和居民节约意识的不断提升,京津冀地区水/能生产部门用能/用水效率的快速提升将使得协同效益继续下降。

## 4 结论与建议

### 4.1 结论

本文基于多区域投入产出模型对京津冀地区水-能系统关联和影响因素进行了分析,并核算了该地区的水-能协同效益。主要结论如下:

(1)京津冀地区能源生产直接使用了大量的水资源,其中河北省能源与水源的直接关联最大,

北京最小,这是因为北京市能源部门采用了更先进的节水技术。三地能源部门通过产业链,尤其是本地和中国(除京津冀)地区产业链,引发了远大于直接用水的虚拟水使用,即能部门对水完全关联远大于直接关联。其中北京市能源部门的虚拟用水强度最大,天津市最小;北京市从能部门对水直接关联最低一跃成为(能部门对水)完全关联最高,反映出能源生产与水资源系统关联的复杂性。

(2)与能部门对水系统关联类似,京津冀各地水部门对能的完全关联均大于直接关联。其中直接关联最大的地区是北京市,最小的是天津市,这主要是因为北京市循环利用了大量的再生水,从而引发较高的用能强度。三地水部门对能的完全关联均对本地的隐含能源依赖较高,北京市和天津市对外国进口能源的依赖也值得注意;其中完全关联最大的地区是河北省,最小的是天津市。京津地区水生产部门的完全用能效率高于中国其他地区 and 世界其他国家的平均水平,而河北省水生产部门的完全用能效率还有待提高。

(3)2012—2017年,京津冀地区电力、热力的生产和供应部门虚拟用水强度(能部门对水完全关联)普遍有所下降。其中北京市2017年比2012年下降了40.71%,天津市下降了57.13%,河北省下降了54.07%,下降的主要原因是中国(除京津冀)地区的技术变动效应和生产结构变动效应。受本地和中国(除京津冀)技术变动效应和生产结构变动效应共同驱动,京津冀地区水资源生产部门隐含用能强度(水部门对能完全关联)也都有所降低。其中天津市下降最多(47.71%),其次为北京市(30.28%)和河北省(24.47%)。

(4)京津冀地区取得了良好的水-能协同效益。其中河北省在直接和完全协同效益中均占比最大,节约直接能源和直接用水占比为77.66%和84.47%,节约隐含能源和虚拟用水占比为83.83%和69.50%。三地水/能生产部门用能/用水效率的提升使得地区2017年协同效益相对2012年有所下降。随着水/能生产部门用能/用水效率的快速提升,京津冀地区未来的水-能协同效益可能继续下降。

### 4.2 政策建议

基于研究结论,本文的政策建议如下:



(1)京津冀地区应当加强合作,共同改善地区水-能利用效率。河北省相较于北京市和天津市能源部门直接用水效率较低。为实现京津冀地区的协调发展,北京和天津应协助河北省改进技术,如配备先进设施、采取水资源综合管理、推动水资源的循环利用和再生水的使用等手段减少相关生产过程中的用水量和用能量。

(2)津冀两地要提高再生水利用率,为地区用水效率的提升做出贡献。再生水的利用可以充分提高水资源的利用效率,有利于节约水资源,但同时也可能导致水的生产和供应业用能强度变大。天津市和河北省在此过程中应当充分借鉴北京市的发展经验,在生产工艺和政策制定上少走弯路。

(3)京津冀三地能源生产部门与水资源的完全关联及水生产部门与能源的完全关联均受到区域内其他地区的技术变动效应和生产结构变动效应影响,但目前这一影响还不太明显。未来京津冀地区在政策制定上应当相互配合,更高效地促进地区水-能协同发展,如能源生产部门使用的水密集型产品或水生产部门使用的能源密集型产品尽量从区域内外用水或用能效率更高的地区调入。

## 参考文献(References):

- [1] 陆大道. 京津冀城市群功能定位及协同发展[J]. 地理科学进展, 2015, 34(3): 265-270. [Lu D D. Function orientation and coordinating development of subregions within the Jing-Jin-Ji urban agglomeration[J]. Progress in Geography, 2015, 34(3): 265-270.]
- [2] 马海涛, 卢硕, 张文忠. 京津冀城市群城镇化与创新的耦合过程与机理[J]. 地理研究, 2020, 39(2): 303-318. [Ma H T, Lu S, Zhang W Z. Coupling process and mechanism of urbanization and innovation in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. Geographical Research, 2020, 39(2): 303-318.]
- [3] Allan J A. Virtual water: A strategic resource global solutions to regional deficits[J]. Ground Water, 2005, 36(4): 545-546.
- [4] 魏怡然, 邵玲, 张宝刚, 等. 北京市虚拟水消费与贸易[J]. 自然资源学报, 2019, 34(9): 1962-1973. [Wei Y R, Shao L, Zhang B G, et al. Virtual water consumption and trade of Beijing[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(9): 1962-1973.]
- [5] Costanza R. Embodied energy and economic valuation[J]. Science, 1980, 210(4475): 1219-1224.
- [6] Zhou Y C, Li H P, Wang K, et al. China's energy-water nexus: Spillover effects of energy and water policy[J]. Global Environmental Change, 2016, 40: 92-100.
- [7] 李桂君, 李玉龙, 贾晓菁, 等. 北京市水-能源-粮食可持续发展系统动力学模型构建与仿真[J]. 管理评论, 2016, 28(10): 11-26. [Li G J, Li Y L, Jia X J, et al. Establishment and simulation study of system dynamic model on sustainable development of water-energy-food nexus in Beijing[J]. Management Review, 2016, 28(10): 11-26.]
- [8] Fang D L, Chen B. Linkage analysis for the water-energy nexus of city[J]. Applied Energy, 2017, 189(3): 770-779.
- [9] 王菲, 曹永强, 范帅邦. “双碳”目标下东北三省水-能源纽带关系及网络特征分析[J]. 生态学报, 2022, 42(14): 5692-5707. [Wang F, Cao Y Q, Fan S B. Analysis of water-energy ties and network characteristics in the three provinces of northeast China under the “double carbon” target[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 5692-5707.]
- [10] 彭焜, 朱鹤, 王赛鸽, 等. 基于系统投入产出和生态网络分析的能源-水耦合关系与协同管理研究: 以湖北省为例[J]. 自然资源学报, 2018, 33(9): 1514-1528. [Peng K, Zhu H, Wang S G, et al. Energy-water nexus in Hubei Province based on system input-output analysis and ecological network analysis[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(9): 1514-1528.]
- [11] 关伟, 赵湘宁, 许淑婷. 中国能源水足迹时空特征及其与水资源匹配关系[J]. 资源科学, 2019, 41(11): 2008-2019. [Guan W, Zhao X N, Xu S T. Spatiotemporal feature of the water footprint of energy and its relationship with water resources in China[J]. Resources Science, 2019, 41(11): 2008-2019.]
- [12] Chen S Q, Chen B. Urban energy-water nexus: A network perspective[J]. Applied Energy, 2016, 184: 905-914.
- [13] Li X, Yang L L, Zheng H R, et al. City-level water-energy nexus in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Applied Energy, 2019, 235: 827-834.
- [14] 夏权智, 吴小芳, 罗京. 中国中间品和最终品贸易中的隐含能源[J]. 环境经济研究, 2020, 5(3): 133-151. [Xia Q Z, Wu X F, Luo J. Energy embodied in China's intermediate and final goods trade[J]. Journal of Environmental Economics, 2020, 5(3): 133-151.]
- [15] 王锋, 高长海. 中国产业部门隐含能源的测度、分解与跨境转移: 基于CRIO模型的研究[J]. 经济问题探索, 2020, (9): 1-11. [Wang F, Gao C H. Measurement, decomposition and cross-border transfer of embodied energy of China's industrial sector: Based on the CRIO model[J]. Inquiry into Economic Issues, 2020, (9): 1-11.]
- [16] 汪艺晗, 杨谨, 刘其芸, 等. “一带一路”国家粮食贸易下虚拟水和隐含能源流动[J]. 资源科学, 2021, 43(5): 974-986. [Wang Y H, Yang J, Liu Q Y, et al. Virtual water and embodied energy transfer in grain trade across the countries along the “Belt and Road”[J]. Resources Science, 2021, 43(5): 974-986.]

2022年11月

- [17] 朱勤, 彭希哲, 陆志明, 等. 中国能源消费碳排放变化的因素分解及实证分析[J]. 资源科学, 2009, 31(12): 2072-2079. [Zhu Q, Peng X Z, Lu Z M, et al. Factor decomposition and empirical analysis of variations in energy carbon emissions in China[J]. Resources Science, 2009, 31(12): 2072-2079.]
- [18] 李虹, 王帅. 需求侧视角下中国隐含能源消费量及强度的影响因素[J]. 资源科学, 2021, 43(9): 1728-1742. [Li H, Wang S. Research on influencing factors of China's energy consumption and intensity: Based on the demand-side perspective[J]. Resources Science, 2021, 43(9): 1728-1742.]
- [19] Pan T, Fan Y Y, Shao L, et al. Multiple accounting and driving factors of water resources use: A case study of Shanghai[J]. Journal of Environmental Management, 2022, DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114929.
- [20] 马晓微, 石秀庆, 王颖慧, 等. 中国产业结构变化对能源强度的影响[J]. 资源科学, 2017, 39(12): 2299-2309. [Ma X W, Shi X Q, Wang Y H, et al. Impact of industrial structural change on energy intensity in China[J]. Resources Science, 2017, 39(12): 2299-2309.]
- [21] Wiedmann T, Wilting H C, Lenzen M, et al. Quo Vadis Mrio? Methodological, data and institutional requirements for multi-region input-output analysis[J]. Ecological Economics, 2011, 70(11): 1937-1945.
- [22] Shao L, Guan D B, Zhang N, et al. Carbon emissions from fossil fuel consumption of Beijing in 2012[J]. Environmental Research Letters, 2016, DOI: 10.1088/1748-9326/11/11/114028.
- [23] 吴兆丹, 赵敏, 田泽, 等. 多区域投入产出分析下中国水足迹地区间比较: 基于“总量-相关指标-结构”分析框架[J]. 自然资源学报, 2017, 32(1): 76-87. [Wu Z D, Zhao M, Tian Z, et al. Regional comparison of water footprint in China based on the multi-regional input-output analysis: In the analytical framework of “amount-relative index-structure”[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(1): 76-87.]
- [24] Leontief W. Quantitative input and output relations in the economic systems of the United States[J]. The Review of Economics and Statistics, 1936, 18(3): 105-125.
- [25] Shao L, Geng Z H, Wu X F, et al. Changes and driving forces of urban consumption-based carbon emissions: A case study of Shanghai[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118774.
- [26] Li J J, Zhang Y L, Deng Y L, et al. Water consumption and conservation assessment of the coal power industry in China[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, DOI: 10.1016/j.seta.2021.101464.
- [27] 唐葆君, 李茹. 基于LMDI模型的北京市电力部门碳排放特征研究[J]. 中国能源, 2016, 38(3): 38-43. [Tang B J, Li R. Study on carbon emission characteristics of Beijing Power Sector based on LMDI model[J]. Energy of China, 2016, 38(3): 38-43.]
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城乡建设统计年鉴2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017. [Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Statistical Yearbook of China's Urban and Rural Construction[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017.]
- [29] 苏晓梅. “水”中的降碳经[N]. 天津日报, 2021-09-05(01). [Su X M. Carbon Reduction in “Water”[N]. Tianjin Daily, 2021-09-05(01).]

## Water–energy nexus and co–benefits in the Beijing–Tianjin–Hebei region

PENG Hui<sup>1,2</sup>, XU Peiqi<sup>1</sup>, SHAO Ling<sup>1</sup>, PAN Yunlong<sup>1</sup>, HE Guojia<sup>1</sup>, GUO Manli<sup>1</sup>, WU Zi<sup>3</sup>

(1. School of Economics and Management, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. School of Economics and Management, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Water and energy resources across the Beijing- Tianjin- Hebei region have formed complex relationship of dependency through supply chains within and outside the region. It is necessary to analyze the water-energy nexus in this region to carry out coordinated management of different natural resources and achieve regional sustainable development. Based on a multi-regional input-output model, this study analyzed the water-energy nexus and the driving forces for its change in the Beijing-Tianjin-Hebei region, based on which the water-energy saving co-benefits were estimated. It is revealed that the complete water-for-energy coefficient of each region was much larger than the direct coefficient. Beijing had the lowest direct water-for-energy coefficient among the three areas. However, since the energy sector of Beijing had imported a lot of high-water- consuming products from the other regions of China, its complete water- for- energy coefficient was the highest of the three. The complete energy-for-water coefficient of each area was larger than the direct coefficient, too. Beijing had the largest direct energy- for- water coefficient among the three areas due to its high recycling rate of wastewater. Hebei Province had the largest complete energy-for-water coefficient because the water use efficiencies of its local industries were not very high. Both the water- for- energy and energy- for- water complete nexus in the Beijing- Tianjin- Hebei region had declined between 2012 and 2017, with the former mainly driven by technological change and production structural change in other regions of China, and the latter driven by a combination of technological change and production structural change in the local region and other regions of China. Overall, the Beijing- Tianjin- Hebei region had achieved significant water-energy co-benefits, but the gains declined in 2017 relative to 2012. With the rapid increase of energy/water use efficiency in the water/energy production sector, the water-energy co-benefits in the Beijing-Tianjin-Hebei region may continue to decline in the future.

**Key words:** virtual water; embodied energy; water-energy nexus; direct nexus; complete nexus; multi-regional input-output model; Beijing-Tianjin-Hebei region