

DOI: 10.5846/stxb202002250335

刘秀丽, 郭丕斌, 王昕. 煤炭资源型地区产业能-水足迹效率及影响因素. 生态学报, 2020, 40(24): 8999-9010.

Liu X L, Guo P B, Wang X. Industrial energy-water footprint efficiency and its influencing factors in coal resource-based areas. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(24): 8999-9010.

## 煤炭资源型地区产业能-水足迹效率及影响因素

刘秀丽<sup>1,2</sup>, 郭丕斌<sup>2,3,\*</sup>, 王昕<sup>1,2</sup>

1 山西财经大学资源型经济转型发展研究院, 太原 030006

2 山西财经大学资源型经济转型协同创新中心, 太原 030006

3 太原学院管理系, 太原 030032

**摘要:**我国煤炭资源型地区众多,但其资源环境等可持续发展问题形势严峻,如何针对能源和水这两种重点资源进行协同管理是解决这些问题的关键之一。基于区域不同产业能-水耦合视角,采用投入产出分析对 2002—2012 年山西省不同产业的能-水足迹效率进行评价,并采用结构分解分析能-水耦合的影响因素,主要结论有:(1)研究期间,山西省各产业能-水足迹都呈上升趋势,能源足迹的增加主要表现为各产业间接消耗能源的增加,而水足迹的增加主要表现为各产业直接消耗水资源的增加。(2)不同行业能-水足迹效率差异很大,足迹较大的产业其足迹效率都较低。尽管研究期间各产业能-水足迹效率呈现上升趋势,但大部分产业能-水足迹效率仍处于较低水平。(3)从各产业能源足迹效率和水足迹效率的耦合情况来看,各产业能-水足迹效率耦合状况趋于优化,逐步由低水足迹效率和中等能源足迹效率( $W_l E_m$ )为主转变为中等水足迹效率和中等能源足迹效率( $W_m E_m$ )为主,但与发达地区相比,仍然具有一定的差距。(4)从能-水足迹效率影响因素来看,各产业技术水平的提高是导致能-水足迹效率提高的主要动力,经济规模的持续扩大是各产业能-水足迹上升的主要原因,部门间的联系和地区经济结构对能-水足迹效率的影响也逐步增加。这些发现从理论上揭示了资源利用强度和效率对产业能-水消耗的影响机制,从实践上对资源型地区节能节水具有重要指导意义。

**关键词:**能源足迹效率;水足迹效率;投入产出分析;结构分解分析;煤炭资源型地区

## Industrial energy-water footprint efficiency and its influencing factors in coal resource-based areas

LIU Xiuli<sup>1,2</sup>, GUO Pibin<sup>2,3,\*</sup>, WANG Xin<sup>1,2</sup>

1 Research Institute of Resource-based Economics, Shanxi University of Finance & Economics, Taiyuan 030006, China

2 Cooperative Innovation Center for Transition of Resource-based Economies, Shanxi University of Finance & Economics, Taiyuan 030006, China

3 Department of Management, Taiyuan University, Taiyuan 030032, China

**Abstract:** There are many coal resource-based areas in China, resource shortage, environment pollution and so on is the key problem of restricting its sustainable development. How to collaborative management of the two key resources of energy and water is one of the key to solve these problems. A large number of scholars have studied the synergetic management of energy and water resources from the perspective of energy-water correlation. However, due to different resource endowments and management policies in different regions, the demand of water and energy in energy and water resources sector is different, and the energy-water coupling relationship is very different in different regions. Especially for the special problem area of coal resource-based area, it still needs a further research how to deeply excavate the energy-water coupling

**基金项目:**国家自然科学基金项目(42001257, 71874119);教育部人文社会科学研究规划基金(17YJA630025);山西省科技厅软科学项目(2019041023-1)

**收稿日期:**2020-02-25; **网络出版日期:**2020-11-05

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guopb@nuc.edu.cn

relationship and influence mechanism of different industries in the area. Based on this, from the perspective of energy-water coupling of different industries in different regions, this paper used input-output analysis to evaluate the energy-water footprint efficiency of different industries in Shanxi Province from 2002 to 2012. At the same time, by using the structural decomposition model, this paper analyzed the influence factors of energy and water coupling. It can provide references for sustainable management of coal and water resources in coal resource-based areas. The main conclusions are as follows: (1) The energy-water footprint of all industries in Shanxi Province from 2002 to 2012 showed an upward trend. The increase in energy footprint was mainly reflected by the increase in indirect energy consumption of various industries, while the increase in water footprint was mainly represented by the increase in direct consumption of water resources in various industries. The energy-water footprint of different industries was obviously different. The industries with large energy footprints were metal smelting and rolling products, mining and service industries; the industries with large water footprints were agriculture, services, and mining. (2) In different industries, the energy-water footprint efficiency varies greatly. The industries with larger energy and water footprints had lower footprint efficiency. Although the energy-water footprint efficiency of various industries in Shanxi Province showed an upward trend from 2002 to 2012, the energy-water footprint efficiency of most industries was still at a low level. (3) From the perspective of the coupling of energy footprint efficiency and water footprint efficiency of various industries, the coupling status of energy-water footprint efficiency of various industries in Shanxi Province tended to optimize from 2002 to 2012. It gradually changed from low water footprint efficiency and medium energy footprint efficiency ( $W_l E_m$ ) to medium water footprint efficiency and medium energy footprint efficiency ( $W_m E_m$ ), but compared with developed regions also had the very big disparity. (4) From the perspective of the influencing factors of energy-water footprint efficiency, the improvement of the technological level of various industries was the main driving force for the improvement of energy-water footprint efficiency. The continuous expansion of the economic scale is the main reason for the increase of each industry's energy-water footprint. The impact of intersectoral linkages and regional economic structures on energy-water footprint efficiency was increasing.

**Key Words:** energy footprint efficiency; water footprint efficiency; input-output analysis; structural decomposition analysis; coal resource-based areas

我国煤炭资源型地区众多,多年来煤炭的过度开发利用严重破坏了当地的水资源,再加上我国能-水分布呈逆向性的客观条件<sup>[1]</sup>,煤炭资源型地区已出现了严重的能-水供需失衡<sup>[2-3]</sup>,预测显示,2012—2020年,中国煤炭消费需求的增加是可供水量增加的3倍多,而每消耗一吨煤炭损耗的水资源量为2.48吨<sup>[4]</sup>,水资源成为约束煤炭资源型地区可持续发展的重要资源。“十四五”时期,煤炭行业将进入全要素、全过程的高质量发展攻坚期。然而,多年来煤炭的过度开发不仅造成了煤炭产能过剩,而且带来一系列的环境问题,煤炭资源型地区每平方公里大气污染负荷为全国平均值的1.6倍。因此,煤炭资源型地区面临着煤控与节水缺一不可的窘境。实际上,煤炭和水资源关系密切,一方面,煤炭开采、利用过程(尤其是火力发电)需要大量的水资源<sup>[5]</sup>;另一方面,在水的生产、使用、处理等过程中,也需要消耗大量的能源<sup>[6]</sup>,通过适当的方式减少每阶段能耗,能够有效减少温室气体排放<sup>[7-8]</sup>。因此,要实现煤炭资源型地区资源的可持续利用,必须在综合考虑不同产业能-水足迹耦合关系的基础上<sup>[6]</sup>,建立能-水协同利用政策体系。

能-水耦合指能源系统和水资源间存在着复杂的关联关系,二者的发展相互关联、相互制约、相互依存<sup>[7]</sup>。关于能-水耦合的最新研究重点关注能源系统中的水消耗,水系统中的能源消耗及其非线性关系<sup>[9]</sup>。其中,关于能-水耦合足迹的研究,采用比较广泛的是投入产出分析,如关联分析、多区域投入产出模型等。由于投入产出分析能够在复杂的系统中根据部门间的相互作用和交换来计算生产商品和服务所需的直接和间接的水或能源流<sup>[10]</sup>,并且通过经济贸易网络<sup>[11-12]</sup>,从经济结构的角度<sup>[13]</sup>,分析资源消耗的驱动力<sup>[14]</sup>,大量学者采用该方法对区域内部经济活动对资源的影响进行了研究。如Fang和Chen<sup>[15]</sup>以北京为例,采用投入产出分

析中的关联分析来检测水和能源的直接和间接消耗以及每个经济部门的作用,从而识别影响能-水关联的关键部门;杨文娟等<sup>[13]</sup>基于区域碳水耦合视角,采用投入产出分析对河南省产业碳水足迹效率进行了对比。由于不同区域资源禀赋、管理政策等导致能源、水资源部门的用水、用能需求不同,能-水关系在不同区域差异很大,多区域投入产出模型(Multiregional Input-output, MRIO)也被广泛应用<sup>[16-17]</sup>。该模型依赖于区域经济投入-产出表和区域间贸易矩阵,可以追踪一个地区的消费活动所产生的资源流,并得到其他地区特定生产部门的产出的支持,适用于区域能-水系统的研究<sup>[18]</sup>,如虚拟水<sup>[12,19]</sup>,能源<sup>[20]</sup>或碳足迹<sup>[21-22]</sup>以及能-水关联<sup>[23]</sup>。武娜等<sup>[24]</sup>采用 MRIO 对晋陕蒙省际贸易中隐含碳排放转移的特征进行研究,为该地区碳减排责任的界定提供了参考依据;Chen 等<sup>[23]</sup>基于 MRIO 模型,提出了一种城市-腹地水能混合单位投入产出方法,分析了不同情景下中国香港和南部城市之间的能-水关系。关于能-水足迹的影响因素研究方面,通常采用因素分解分析<sup>[25]</sup>。因素分解包括指数分解分析和结构分解分析,指数分解分析对数据要求较低,常用于时间序列分析<sup>[26-27]</sup>;结构分解以投入产出表为基础,可同时考虑部门间的直接和间接联系,从而判断行业结构、技术进步等对水或能源足迹的贡献<sup>[9]</sup>,应用较为广泛<sup>[9,14]</sup>。影响能-水足迹的因素通常有技术进步、部门间联系、经济水平、经济结构等<sup>[21,28]</sup>。以上成果均为区域能-水关系的研究提供了参考借鉴。

然而,前期的研究大量集中在国家、区域等较大的研究尺度,针对特殊区域,尤其是煤炭资源型地区的能-水足迹研究还较缺乏。此外,不同产业能-水足迹强度的差异会导致不同产业能-水利用效率的不同。因此,综合分析不同产业能-水足迹效率的差异以及深入挖掘不同产业能-水足迹变化的影响因素,对揭示资源利用强度和效率对产业能-水消耗的影响机制,以及资源型地区资源转型中的节能节水具有重要意义。山西省作为我国典型的煤炭资源型地区,尽管打造全国能源革命排头兵的总体效果不断显现,煤炭占山西省能源产品消费的比例已由 2010 年 86.61% 下降到 2017 年的 76.92%,然而煤炭依然是山西省及中国未来的主要能源,2017 年,山西省电源结构来源中火电占比仍高达 97.80%。此外,山西省水资源总量  $83.8 \times 10^8$  立方米,人均水资源量 298 立方米,为全国平均水平的 13%,水资源严重短缺<sup>[29]</sup>。作为全国能源革命排头兵、资源型地区转型综合改革配套示范区,如何率先完成节能降耗的约束指标,具有重要意义。基于此,本文以山西省为案例区,从区域不同产业能-水耦合视角,采用投入产出分析对 2002—2012 年不同产业的能-水足迹效率进行评价,并采用结构分解分析能-水足迹的影响因素,对山西省资源型经济转型发展和能-水管理政策的制定提供参考。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 数据来源及处理

各部门的直接水资源和能源消耗数据来源于 2003 年、2008 年和 2013 年的《山西统计年鉴》《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》,2002 年、2007 年和 2012 年的《山西省水资源公报》和《山西省投入产出表》。采用双重缩减法将 2007 年和 2012 年投入产出数据转换为 2002 年不变价,以避免数据的不可比性<sup>[20]</sup>。

根据部门的关联度和相似性对投入产出表中的部门进行合并。一般可以按照三次产业和细分行业进行合并,但后者更具有产业针对性。本文参考杨文娟等<sup>[13]</sup>、黄钰<sup>[30]</sup>和潘文卿等<sup>[31]</sup>的研究结果,按照产业对中间投入品的消耗相似度以及煤炭资源型地区产业特点,将投入产出表中的 42 个部门合并为 23 个(表 1 为 2012 年部门合并过程,2002 和 2007 年合并过程相同,不再赘述)。农业直接用水量来自于《山西省水资源公报》;工业各产业部门直接用水量根据《山西省统计年鉴》和不同产业部门的工业用水量因子来计算,其中工业用水量因子来源于 Shao 等<sup>[32]</sup>论文中虚拟水强度数据库中的结果;服务业和建筑业的直接用水量借鉴中国投入产出学会课题组<sup>[33]</sup>和关爱萍<sup>[34]</sup>的研究,采用山西省服务业产值占全国的比重推算得出服务业的直接用水量,山西省总耗水量减去其他产业耗水量即为建筑业的直接用水量。对各产业直接能源消耗亦采用同样的推算方法。

### 1.2 能-水足迹计算

#### 1.2.1 投入产出法

本文以 2002、2007、和 2012 年山西省经过合并后的 23 个部门投入产出表为基础,对各产业部门的能-水

消费进行动态核算。首先计算直接消耗系数矩阵 A:

$$A = [a_{ij}], a_{ij} = \frac{X_{ij}}{X_j} \tag{1}$$

式中, A 为直接消耗系数矩阵,  $a_{ij}$  为单位直接消耗系数,  $X_{ij}$  为投入产出表中  $i$  产业向  $j$  产业的直接经济投入量(万元);  $X_j$  为  $j$  产业的总产出量(万元)。其次计算完全消耗系数矩阵 B:

$$B = [I - A]^{-1} = [b_{ij}] \tag{2}$$

式中, B 为完全消耗系数矩阵, I 为单位矩阵,  $b_{ij}$  为单位完全消耗系数, 是第  $j$  个产业增加单位产出直接和间接消耗的第  $i$  个产业的总价值量。

表 1 合并后的 2012 年山西省投入产出表 23 部门

Table 1 23 sectors in combine input-output table of Shanxi Province in 2012

序号 Serial number	合并后的 23 部门 23 Merged sectors	序号 Serial number	合并后的 23 部门 23 Merged sectors
1	农业	13	通用和专用设备制造业
2	采矿业	14	交通运输设备制造业
3	食品和烟草业	15	电气机械和器材制造业
4	纺织业	16	通信设备、计算机和其他电子设备制造业
5	纺织服装业	17	仪器仪表制造业
6	木材加工业	18	其他制造业
7	造纸印刷业	19	废品废料业
8	炼焦产品业	20	电力、热力和燃气的生产和供应业
9	化学产品业	21	水的生产和供应业
10	非金属矿物制品业	22	建筑业
11	金属冶炼和压延加工品业	23	服务业
12	金属制品业		

数据来源:《山西省投入产出表》(2012)

### 1.2.2 能源足迹计算

能源足迹是指某种活动消耗的直接或间接的能源消费量<sup>[35]</sup>。首先计算各产业的直接能源足迹强度  $D_{ej}$ :

$$D_{ej} = \frac{e_j}{X_j} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \tag{3}$$

式中,  $D_{ej}$  为第  $j$  产业的直接能源足迹强度,  $e_j$  为第  $j$  产业的直接能源消费量(万吨),  $X_j$  为  $j$  产业的总产出量(万元)。将  $D_{ej}$  对角化处理乘以完全消耗系数矩阵 B, 可得到山西省各产业的隐含能源足迹强度矩阵  $M_e$  和隐含能源足迹  $TF_{ej}$ :

$$M_e = \overline{D_{ej}} \times [I - A]^{-1}, TF_{ej} = M_e \times \overline{Y_j} \times [1, 1, \dots]_n^T \tag{4}$$

式中,  $M_e$  为隐含能源足迹强度矩阵,  $TF_{ej}$  为山西省各产业的隐含能源足迹,  $\overline{Y_j}$  为  $j$  产业最终使用合计的对角矩阵。

能源足迹效率是指各个产业直接和间接消耗的隐含能源利用效率, 用各产业的总产出量和隐含能源足迹的比值表示。

### 1.2.3 水足迹计算

水足迹指一个国家、一个地区或一个人在一定时期内消费的所有产品和服务所需要的水资源总量<sup>[36]</sup>。本文采用基于投入产出分析的水足迹指标来计算各产业消费的水资源总量。首先计算各产业的直接水足迹强度, 即第  $j$  个产业每增加单位产出的直接耗水量:

$$D_{wj} = \frac{w_j}{X_j} \tag{5}$$

式中,  $A_{wj}$  为第  $j$  产业的直接水足迹强度,  $w_j$  为第  $j$  产业的直接耗水量(万吨),  $X_j$  为  $j$  产业的总产出量(万元)。将  $D_{wj}$  对角化处理, 与完全消耗系数矩阵  $B$  相乘, 即地区所有产业的虚拟水足迹强度  $T_w$ :

$$T_w = \overline{D_{wj}} \times [I-A]^{-1} = \overline{D_{wj}} \times [b_{ij}], T_{wj} = \sum D_{wj} \times b_{ij} \quad (6)$$

根据直接水足迹强度和虚拟水足迹强度可计算各产业的直接水足迹  $DF_{wj}$  和虚拟水足迹  $TF_{wj}$ :

$$DF_{wj} = D_{wj} \times Y_j, TF_{wj} = T_{wj} \times Y_j \quad (7)$$

式中,  $Y_j$  为  $j$  产业最终使用合计(万元)。

水足迹效率是指各个产业直接和间接消耗的虚拟水资源利用效率, 用各产业的总产出量和虚拟水足迹的比值表示。

### 1.3 结构分解法

根据虚拟水足迹和隐含能源足迹的计算公式, 二者可以被分解为:

$$C_j = D_{wj} \times b_{ij} \times Y_j \times g, TF_{ej} = D_{ej} \times b_{ij} \times Y_j \times g \quad (8)$$

式中,  $D_{ej}$  表示技术进步对能-水足迹的影响, 本文用  $t$  表示;  $b_{ij}$  表示不同产业之间的联系对能-水足迹的影响, 本文用  $b$  表示;  $Y_j$  表示经济结构对能-水足迹的影响, 本文用  $y$  表示;  $g$  表示经济规模对能-水足迹的影响, 本文采用 GDP 来表示经济规模。因此, 完全水足迹和完全能源足迹的变量为:

$$\Delta TF_{wj} = TF_{wj2} - TF_{wj1}, \Delta TF_{ej} = TF_{ej2} - TF_{ej1} \quad (9)$$

式中, 下标 2 表示期末年份, 下标 1 表示基准年份, 本文的研究期间分别为 2002—2007 年和 2007—2012 年。影响能-水足迹的影响因素有 4 个, 根据 Dietzenbacher 的研究<sup>[37]</sup> 可计算得出虚拟水足迹和隐含能源足迹的分解式一共有  $4! = 24$  个。采用极值平均分解法对  $TF_w^1$ ,  $TF_w^{24}$ ,  $TF_e^1$  和  $TF_e^{24}$  进行估算, 则虚拟水足迹和隐含能源足迹的变量可分解为:

$$\Delta TF_w / \Delta TF_e = \Delta t + \Delta b + \Delta y + \Delta g \quad (10)$$

$$24\Delta t = \frac{1}{2} \sum (t_{j2} - t_{j1}) (b_{ij1} \times y_{j1} \times g_1) + (t_{j2} - t_{j1}) (b_{ij2} \times y_{j2} \times g_2) \quad (11)$$

$$\Delta b = \frac{1}{2} \sum (b_{ij2} - b_{ij1}) (t_{j2} \times y_{j1} \times g_1) + (b_{ij2} - b_{ij1}) (t_{j1} \times y_{j2} \times g_2) \quad (12)$$

$$\Delta y = \frac{1}{2} \sum (y_{j2} - y_{j1}) (t_{j2} \times b_{ij2} \times g_1) + (y_{j2} - y_{j1}) (t_{j1} \times b_{ij1} \times g_2) \quad (13)$$

$$\Delta g = \frac{1}{2} \sum (g_2 - g_1) (t_{j2} \times b_{ij2} \times y_{j2}) + (g_2 - g_1) (t_{j1} \times b_{ij1} \times y_{j1}) \quad (14)$$

式中,  $\Delta t$  为技术进步因素,  $\Delta b$  为部门间经济联系因素,  $\Delta y$  为经济结构因素,  $\Delta g$  为经济规模因素。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同产业能-水足迹

能源和水资源是煤炭资源型地区的两种重要和关键资源, 根据公式(1)—(7)可计算出 2002—2012 年山西省各产业能-水足迹的演变情况(图 1)。可以看出, 能源和水资源在产业活动中关系密切, 然而其能源足迹和水足迹在产业间存在不匹配的现象。

从能源足迹来看, 2002—2012 年山西省总的隐含能源足迹从 27072.08 万吨标准煤增加到 77785.98 万吨标准煤, 增长了 2.87 倍, 但是直接能源足迹占隐含能源足迹的比例呈现下降的趋势, 从 2002 年的 33.83% 下降到 2012 年的 24.85%, 表明研究期间山西省能源足迹的增加主要表现为各产业间接消耗能源的增加。其中, 金属冶炼和压延加工品业是隐含能源足迹最大的产业, 2012 年该产业的隐含能源足迹占山西省隐含能源足迹的 18.73%, 但相比 2002 年, 该占比下降了 2.23 个百分点, 主要原因为产业技术水平的提升。其次为采矿业, 2002 年该产业的隐含能源足迹占山西省隐含能源足迹的 8.87%, 且一直保持持续增长的势头, 2012 年该

份额增加到 15.00%，主要因为采矿业为山西省传统产业，2002—2012 年山西省采矿业发展迅速，产业经济规模持续扩大，产业总产值占山西省总产值的比重由 2002 年的 12.15% 增加到 21.66%。第三为服务业，2012 年服务业的隐含能源足迹占山西省隐含能源足迹的 11.33%，但和 2002 年相比，该比重下降了 8.11 个百分点，表明全社会节能节水成效显著，但是也要注意随着山西省产业结构的演变，服务业占三次产业比重不断增加，山西省能源政策的制定应重点关注到服务业耗能增速加大经济转型，从而倒逼能源转型。

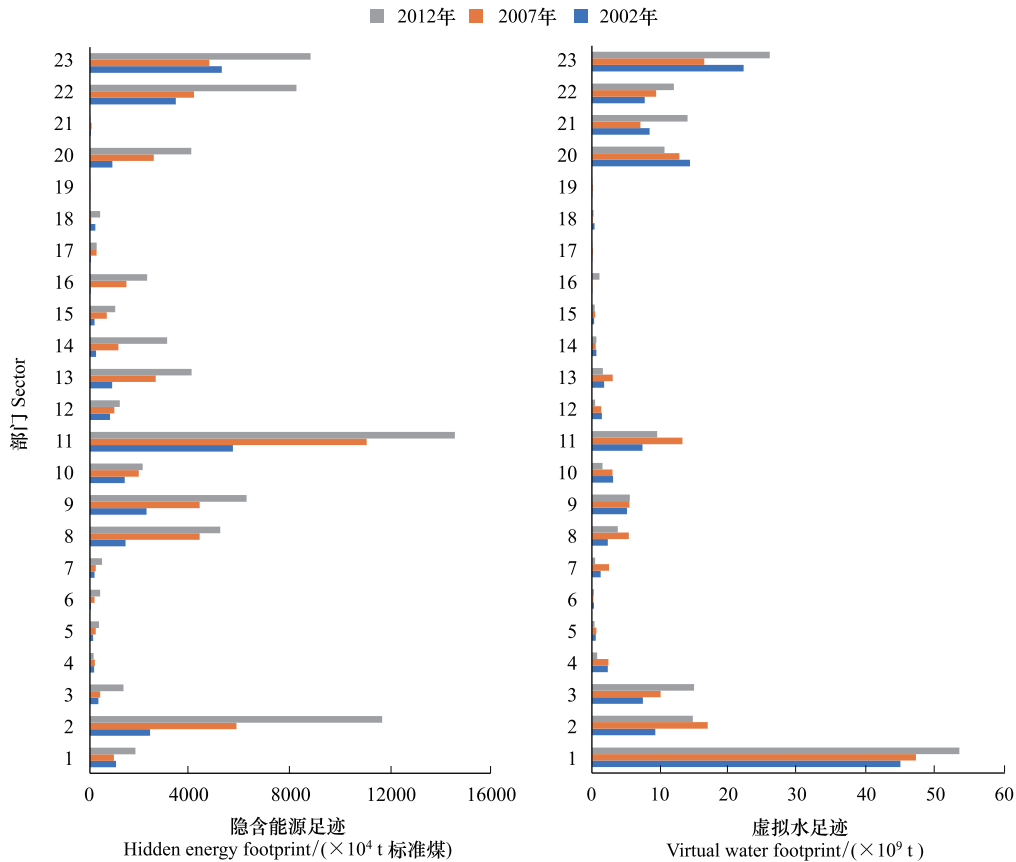


图 1 2002—2012 年山西省各产业能-水足迹演变

Fig.1 Evolution of energy-water footprint of different industries in Shanxi Province from 2002 to 2012

1: 农业; 2: 采矿业; 3: 食品和烟草业; 4: 纺织业; 5: 纺织服装业; 6: 木材加工业; 7: 造纸印刷业; 8: 炼焦产品业; 9: 化学产品业; 10: 非金属矿物制品业; 11: 金属冶炼和压延加工品业; 12: 金属制品业; 13: 通用和专用设备制造业; 14: 交通运输设备制造业; 15: 电气机械和器材制造业; 16: 通信设备、计算机和其他电子设备制造业; 17: 仪器仪表制造业; 18: 仪器仪表制造业; 19: 废品废料业; 20: 电力、热力和燃气的生产和供应业; 21: 水的生产和供应业; 22: 建筑业; 23: 服务业

从水足迹来看，2002—2012 年山西省总的虚拟水足迹从 140.83 亿吨增加到 2012 年的 171.73 亿吨，直接水足迹占虚拟水足迹占比由 2002 年的 48.03% 增加到 50.51%，表明山西省水资源足迹的增加主要表现为各产业直接消耗水资源的增加。农业是水资源消耗最大的部门，2012 年，农业虚拟水足迹占山西省虚拟水足迹的 31.09%，而农业消耗的虚拟水中 81.85% 为农业灌溉直接消耗的水资源，相比 2002 年增加了 8.71 个百分点，表明山西省农业用水浪费严重，存在较大的节能潜力。其次为服务业，虚拟水足迹占比 15.03%，第三为采矿业，虚拟水足迹占比 8.53%，其中服务业和采矿业的直接水足迹占比分别为 22.39% 和 20.20%，表明服务业和采矿业消耗的水资源主要为产品生产过程中的间接消耗。以上三个部门 2002—2012 年虚拟水足迹均呈现增加的趋势，表明其用水效益较低。而食品和烟草业、纺织业、木材加工业、造纸印刷业等轻工业部门的虚拟水足迹则呈现减少的趋势，说明这些产业的用水效益较高。未来山西省在制定水资源调配政策时应综合考虑各产业之间的直接和间接联系，对水耗低、发展速度快的产业应加大水资源的供应和鼓励，对农业、服务业

和采矿业等用水量较高的产业应加强技术投入,提高产业的用水效益。值得注意的是,服务业和采矿业的能源足迹和水足迹均比较高,未来山西省既需提高服务业和采矿业的能源效率又需提高其水资源效率。

### 2.2 不同产业能-水足迹效率

#### 2.2.1 不同产业能-水足迹效率演变

总体看来,能源足迹和水足迹较大的产业其足迹效率都较低。农业和水的生产与供应业的能源足迹效率较高,水足迹效率偏低,主要因为这两个产业都是耗水大而耗能小的产业。服务业的能源足迹效率最高,2012年能源足迹效率比2002年增加了4.72倍,主要因为全社会节能意识的增强,以及服务业产出的持续增加,因此,山西省在产业结构调整中应进一步鼓励服务业的发展。2002—2012年,采矿业能源足迹效率提高不明显,仅增加了2.28倍,表明山西省采矿业能源的粗犷利用仍然存在,大力改进采矿工艺,提高采矿业能源利用效率是山西省能源转型亟需解决的问题。与能源足迹效率相比,采矿业水足迹效率大幅提高。2002—2012年,采矿业水足迹效率提高了6.92倍,煤矿节水工艺和设备的大力使用,尤其是井下生产用水节水工艺的大力普及,以及职工节水意识提高、生活污水和矿井涌水处理系统的运行等水循环系统的投入都是山西省采矿业水足迹效率提高的原因,此外,这也与山西省水资源日益短缺倒逼采矿业节水工艺的提升有关。但和其他产业相比,2012年采矿业的能-水足迹效率均属于中等水平,提高能-水利用效率仍是制定采矿业产业政策关注的重点。电力、热力和燃气的生产和供应业的能-水足迹效率均低于采矿业,但2012年能-水足迹效率分别比2002年增长了3.03和6.01倍。主要因为山西省电源结构的改善,2002—2012年火电占比由98.5%

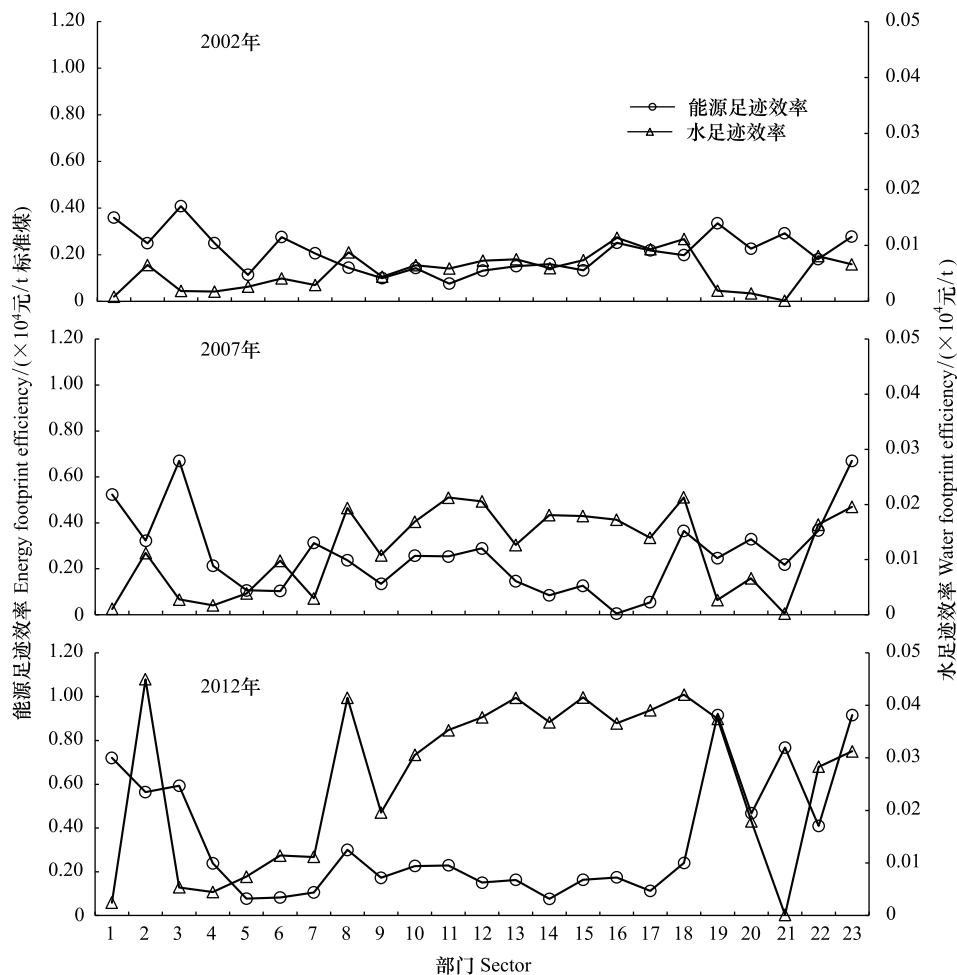


图2 2002—2012年山西省各产业能-水足迹效率

Fig.2 Energy-water footprint efficiency of different industries in Shanxi Province from 2002 to 2012

下降到 95.51%,行业用水大幅度减少,但由于该产业本身属于高耗能和高耗水行业,持续提高能-水利用效率是该行业可持续发展的关键。建筑业的能-水足迹效率低于电力、热力和燃气的生产和供应业,虽然建筑业直接消耗的能源和水都较少,但是来自上游产业间接消耗的能源足迹和水足迹较大,间接能源足迹和间接水足迹占比分别为 98.01%和 86.83%,因此建筑业能源足迹效率和水足迹效率都偏低,未来制定建筑业产业政策应重点关注建筑业上下游产业间的联系。此外,大多数制造业的能源足迹效率和水足迹效率均处于较低水平,主要原因为山西省制造业发展水平不高,耗能耗水的粗放式发展方式仍然存在。

### 2.2.2 不同产业能-水足迹效率耦合关系

从以上分析可以看出,不同行业能源足迹效率和水足迹效率差异很大。采用不同产业能-水足迹效率的耦合关系来比较不同产业的耗能效率和耗水效率的匹配情况。根据能源足迹效率和水足迹效率大小,将水足迹效率分为高 ( $W_h > 0.05$ )、中 ( $0.01 < W_m < 0.05$ ) 和低 ( $W_l < 0.01$ ) 三种类型;将能源足迹效率分为高 ( $E_h > 0.5$ )、中 ( $0.1 < E_m < 0.5$ ) 和低 ( $E_l < 0.1$ ) 三种。按照能-水足迹效率耦合关系,将山西省不同产业能-水足迹效率分为以下六种类型:  $W_m E_h$  (水能高效利用型)、 $W_m E_m$  (水能中等利用型)、 $W_m E_l$  (能源低效利用型)、 $W_l E_h$  (能源高效利用型)、 $W_l E_m$  (水低效利用型)、 $W_l E_l$  (水能低效利用型)。

总体来看,研究期间山西省各产业能-水效率耦合状况趋于优化,逐步由  $W_l E_m$  为主转变为  $W_m E_m$  为主。2002 年,山西省 2 个产业属于  $W_l E_l$ , 分别是化学产品业、金属冶炼和压延加工业。这些产业与发达地区相比,在山西省发展较为落后,产业的经济产出较低,导致能-水足迹效率较低。农业、采矿业、食品和烟草业、纺织业、木材加工业、造纸业、炼焦产品业、非金属矿物制品业、金属制品业、电力、热力和燃气的生产和供应业、水的生产和供应业、建筑业、服务业等 19 个产业属于  $W_l E_m$ , 表明该时期山西省处于耗水耗能的粗放式发展时期。只有通信设备制造业、计算机和其他电子设备制造业和其他制造业属于  $W_m E_m$ 。2007 年,属于  $W_l E_m$  的产业减少到 4 个,而属于  $W_m E_m$  的产业增加到 10 个,包括纺织服装业和木材加工业,和 2002 年相比木材加

工业的能源效率由中等变为低水平,原因是能源投入的增加。属于  $W_m E_l$  的产业增加到 3 个,而服务业提高到  $W_m E_h$ , 说明服务业发展较为迅速,产值增长较快。2012 年,山西省各产业能-水足迹效率均大幅提高,只有纺织服装业从 2007 年的  $W_l E_m$  下降到  $W_l E_l$ , 应严格监控该产业的用能用水情况,尽快提高产业技术水平,以提高其能-水足迹效率。属于  $W_m E_m$  的产业增加到 12 个,表明山西省制造业水平有一定程度的提高,但和发达地区相比,仍然具有一定的差距。属于  $W_m E_h$  的产业除了服务业外,还增加了采矿业和废品废料业,主要原因为随着节能环保产业的发展,废品废料业产出增加显著提高,山西省能源结构逐步改善,能源利用效率明显提高,与 2007 年相比,吨原煤生产综合能耗下降 11.27%。

### 2.3 不同产业能-水足迹效率影响因素

根据结构分解分析结果可以看出(图 4),2002—2012 年,各个产业的技术进步因素 ( $\Delta t$ ) 持续呈现负值,表明各产业技术水平的提高是导致能-水足迹效率提高的主要动力;而各个产业的经济规模因素 ( $\Delta g$ ) 持续为正值,表明经济规模的持续扩大是山西省各产业能-水足迹上升的主要原因。从各个因素的贡献值来看,2002—2012 年,经济规模对能源效率的贡献值由 1370.35% 下降到 645.24%,而经济结构的贡献值由 0.54% 变化为 -264.49%,表明经济结构的改变对能源效率的提高起到积极作用,能源足迹效率影响因素由经济规模为主向经济规模和经济结构影响共同作用转变。经济规模对水足迹效率的贡献值由 382.24% 增加到 525.79%,

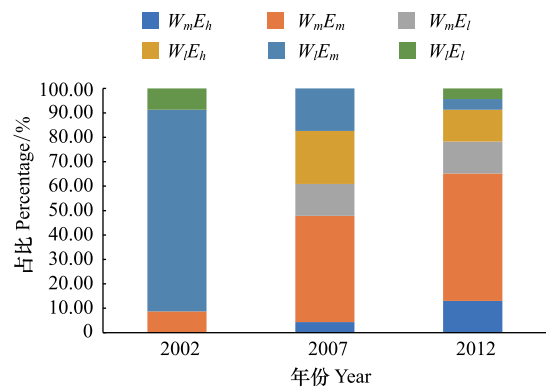


图 3 2002—2012 年山西省各产业能-水足迹效率耦合状况  
Fig.3 Energy-water footprint efficiency coupling status of various industries in Shanxi Province from 2002 to 2012



部门间的联系对水足迹效率的贡献值由-43.49%变化为-242.72%,经济结构对水足迹效率的贡献值由42.04%变化为-195.20%,表明水足迹效率的影响因素则由部门间的经济联系为主向经济规模、部门间经济联系和经济结构共同作用转变。

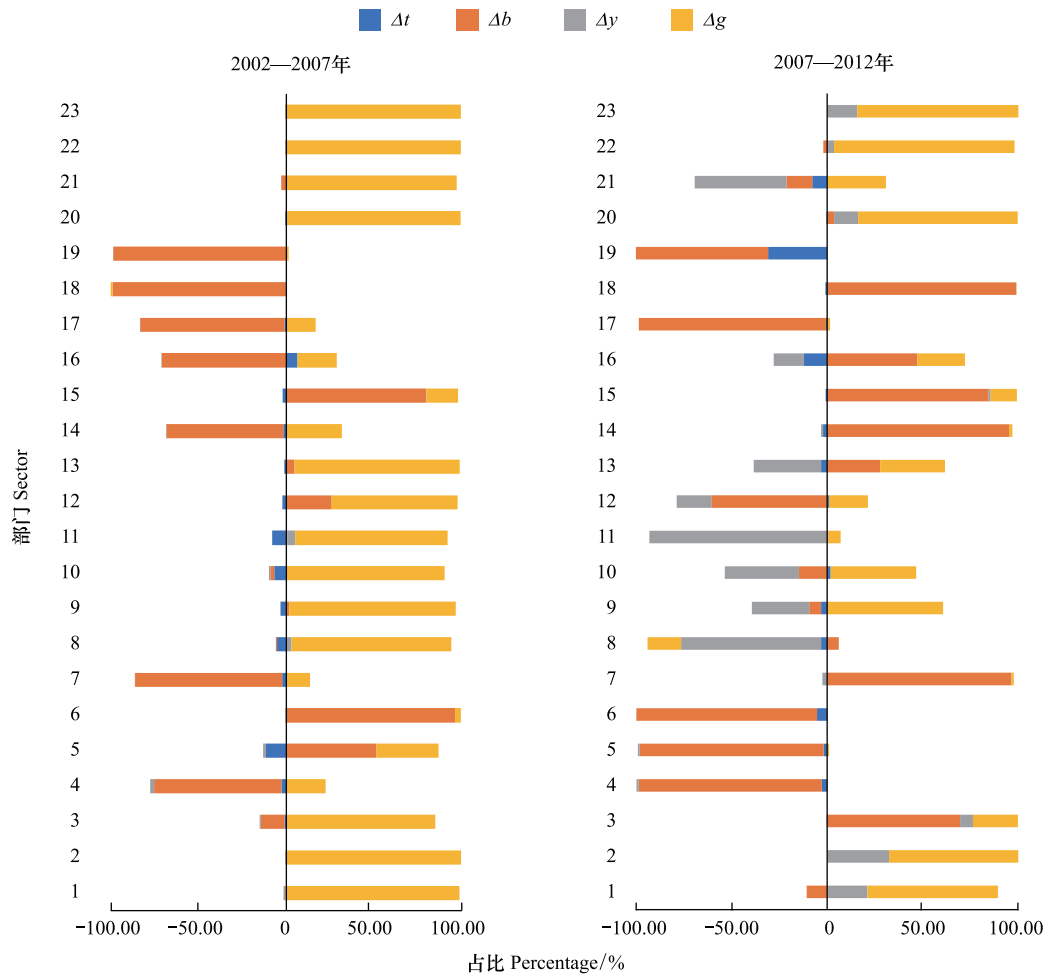


图 4 2002—2012 年山西省各产业能源足迹效率影响因素贡献值

Fig.4 The contribution value of the factors influencing the energy footprint efficiency of different industries in Shanxi Province from 2002 to 2012

具体来看,首先,部门间的经济联系对产业能-水足迹效率的影响逐渐增加。2002—2012年,23个产业中有一半的产业影响能源和水足迹效率的经济联系贡献值大于50%。尤其是对水足迹效率的影响较大,2007—2012年,纺织服装业、木材加工业、仪器仪表制造业和其他制造业的部门间经济联系贡献值均在90%以上。表明该产业水足迹效率的提高需要更多考虑到上下游产业间的联系。其次,经济规模因素已不再是影响能-水足迹效率的主要因素。2002—2007年,分别有12个和4个产业其经济规模因素对能源足迹效率和水足迹效率的贡献值大于50%,而2007—2012年,分别仅仅有6个和5个产业影响能源足迹效率和水足迹效率的经济规模贡献值大于50%,且累计贡献率也呈现降低趋势。第三,地区经济结构也对产业能-水足迹效率有一定的影响。2002—2012年,经济结构因素对产业能源足迹效率的影响高于水足迹效率,主要原因为能源足迹受经济结构的影响较为显著。研究期间,山西省产业结构由“二、一、三”逐渐演变为“二、三、一”的格局,第二产业趋于稳定,第三产业发展较快,第三产业能源投入较少,能源足迹效率较高。最后,产业的技术进步水平也会直接影响能-水足迹效率。尤其是水的生产与供应业、农业、造纸印刷业等用水量较大的部门,技术进步对

产业水足迹效率的影响尤为明显,因此针对这些部门,尽快提高产业技术水平是提高水足迹效率的重要手段。

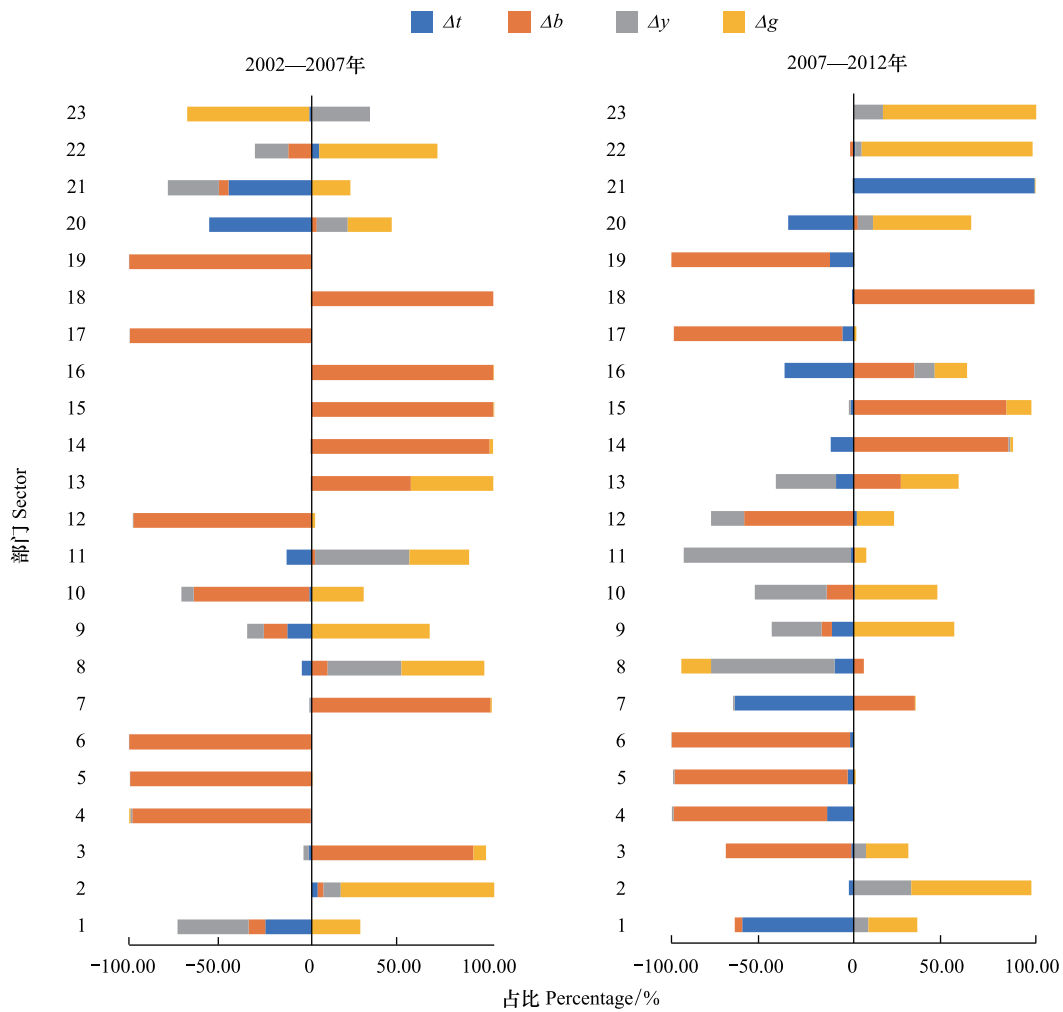


图5 2002—2012年山西省各产业水足迹效率影响因素贡献值

Fig.5 The contribution value of the factors influencing the water footprint efficiency of different industries in Shanxi Province from 2002 to 2012

### 3 结论和建议

本文从区域不同产业能-水耦合视角,采用投入产出分析对2002—2012年不同产业的能-水足迹效率进行评价,并采用结构分解模型分析能-水耦合的影响因素,主要结论有:(1)2002—2012年,山西省各产业能-水足迹都呈上升趋势,能源足迹的增加主要表现为各产业间接消耗能源的增加,而水足迹的增加主要表现为各产业直接消耗水资源的增加。不同产业能-水足迹差异明显,能源足迹较大的产业依次为金属冶炼和压延加工品业、采矿业和服务业;而水足迹较大的产业依次为农业、服务业和采矿业。(2)不同行业能-水足迹效率差异很大,能源足迹和水足迹较大的产业其足迹效率都较低。尽管研究期间各产业能-水足迹效率呈现上升趋势,但大部分产业能-水足迹效率仍处于较低水平。服务业的能-水足迹效率较高,其次为采矿业和炼焦产品业,大多数制造业的能-水足迹效率均处于较低水平。(3)从各产业能源足迹效率和水足迹效率的耦合情况来看,各产业能-水足迹效率耦合状况趋于优化,逐步由  $W_l E_m$  为主转变为  $W_m E_m$  为主。(4)从能-水足迹效率影响因素来看,各产业技术水平的提高是导致能-水足迹效率提高的主要动力,经济规模的持续扩大是各产业能-水足迹上升的主要原因。部门间的联系和地区经济结构对能-水足迹效率的影响逐步增加。

根据上文的研究,对优化山西省不同产业能-水足迹效率耦合提出如下建议:(1)山西省各个产业能源足迹效率和水足迹效率均处于较低水平,增强节能节水意识,提高各个产业的技术水平以提高能源足迹效率和水足迹效率是山西省产业政策关注的重点。通过影响能-水足迹效率的因素分析可以看出,各部门之间的联系对水足迹效率的影响呈现明显的积极作用,意味着在水资源政策的制定中要综合考虑各产业之间的经济联系,注重产业链建设,产业之间形成用自来水、中水、污水多级利用的产业链;地区经济结构对能源足迹效率的影响较大,因此,在能源政策的制定中要重点考虑地区经济结构的调整,如大力发展低耗能产业,区域内产业之间的能源进行多级循环利用,形成循环经济产业园区等。(2)分行业来看,农业水足迹最大,水足迹效率最低,可鼓励农户由分散的个体种植转变为规模化种植,鼓励农户种植耐旱、高产的作物,开发节水灌溉方式,以提高农业用水效率;采矿业水足迹效率高于能源足迹效率,应加快清洁能源的开发,继续优化能源结构,加快提高能源利用效率;大多数制造业的能源足迹效率和水足迹效率均比较低,加快推动制造业高质量发展,提高制造业经济效益是提高能-水足迹效率的关键;服务业的能源足迹和水足迹都比较高,且呈现持续增长态势,应加强服务业内部产业结构的调整,大力发展耗水和耗能低、效益高的产业,政府给予优先发展的支持,对餐饮业等耗水耗能高的产业则应该通过调整水价、加强水资源监督、扩大节能节水宣传力度等方式提高水足迹效率。(3)需要注意不同产业的能-水足迹协同问题。在制定能源和水资源政策时,应充分考虑能源和水资源的关联关系,在促进经济发展的同时,充分考虑地区的资源承载力,要以水定产。因此,在当前山西省能源-水资源矛盾突出的情况下,考虑到不同产业能-水足迹效率差异明显的特点,一方面要通过产业结构调整,逐步淘汰能-水足迹效率差的产业,另一方面要通过技术创新提高产业能-水足迹效率。这一思路对其它资源型地区能-水协同治理同样具有指导意义。

本文仍有一定的局限性。首先,关于研究期的问题,由于文章采用投入产出分析,主要数据来源为投入产出表,山西省最新的投入产出表截止到 2012 年,由于最新数据的缺失,导致研究结果并不能精确评价山西省产业能-水足迹的现状,但通过本研究得到产业能-水足迹演变的过程和趋势,对山西省产业政策的制定仍有一定的意义。其次,本文以山西省为例进行研究,研究范围具有一定的局限性,未来可进一步研究中国所有煤炭资源型地区的能-水足迹问题,并对其时空特征进行分析。第三,不同产业的能-水足迹是通过能源、水资源在不同产业之间的流通过程实现的,如何提高能-水足迹效率需要进一步评价不同产业之间的能-水关联程度,以制定有效的不同产业能-水协同利用政策。如何深入挖掘不同产业能-水足迹耦合的关系和动力机制,是进一步研究的方向。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 洪思扬,王红瑞,来文立,朱中凡. 我国能源耗水空间特征及其协调发展脱钩分析. 自然资源学报, 2017, 32(05): 800-813.
- [ 2 ] Zhang C, Zhou L J, Wang J. Decoupling between water use and thermoelectric power generation growth in China. *Nature Energy*, 2018(3): 792-799.
- [ 3 ] Zhang C, Zhong L, Fu X, Zhao Z. Managing scarce water resources in China's coal power industry. *Environmental Management*, 2016, 57(6): 1188-1203.
- [ 4 ] 李崇茂. 煤炭资源开采系统与水资源生态系统健康度评价与协同关系研究. 中国矿业大学, 2018.
- [ 5 ] 项潇智,贾绍凤. 中国能源产业的现状需水估算与趋势分析. 自然资源学报, 2016, 31(01): 114-123.
- [ 6 ] 彭焜,朱鹤,王赛鸽,陈斌,魏文栋,李佳硕. 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. 自然资源学报, 2018, 33(09): 1514-1528.
- [ 7 ] 顾阿伦,姜冬梅,张月. 能源-水关系研究现状及对我国的启示. *生态经济*, 2016, 32(07): 20-23+28.
- [ 8 ] 李良,毕军,周元春,刘苗苗. 基于粮食-能源-水关联关系的风险管控研究进展. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(07): 85-92.
- [ 9 ] Duan C, Chen B. Driving factors of water-energy nexus in China. *Applied Energy*, 2020, 257: 113984.
- [ 10 ] Zhang Y, Zheng H M, Yang Z F, Li Y X, Liu G Y, Su M R, Yin X A. Urban energy flow processes in the Beijing-Tianjin-Hebei (Jing-Jin-Ji) urban agglomeration: combining multi-regional input-output tables with ecological network analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 114: 243-256.
- [ 11 ] Feng K, Chapagain A, Suh S, Pfister S, Hubacek K. Comparison of bottom-up and top-down approaches to calculating the water footprints of

- nations. *Economic Systems Research*, 2011, 23(4): 371-385.
- [12] 魏怡然, 邵玲, 张宝刚, 徐佩琦, 秦菁敏. 北京市虚拟水消费与贸易. *自然资源学报*, 2019, 34(09): 1962-1973.
- [13] 杨文娟, 赵荣钦, 张战平, 肖连刚, 曹连海, 王帅, 杨青林. 河南省不同产业碳水足迹效率研究. *自然资源学报*, 2019, 34(01): 92-103.
- [14] Su B, Ang B W, Low M. Input-output analysis of CO2 emissions embodied in trade and the driving forces: processing and normal exports. *Ecological Economics*, 2013, 88: 119-125.
- [15] Fang D, Chen B. Linkage analysis for the water-energy nexus of city. *Applied Energy*, 2017, 189: 770-779.
- [16] Dai J, Wu S, Han G, Weinberg J, Xie X, Wu X, Song X, Jia B, Xue W, Yang Q. Water-energy nexus: a review of methods and tools for macro-assessment. *Applied Energy*, 2018, 210: 393-408.
- [17] 韩中, 王刚. 基于多区域投入产出模型中美贸易隐含能源、碳排放的测算. *气候变化研究进展*, 2019, 15(04): 416-426.
- [18] Wang S, Chen B. Energy-water nexus of urban agglomeration based on multiregional input-output tables and ecological network analysis: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Applied Energy*, 2016, 178: 773-783.
- [19] 蔡振华, 沈来新, 刘俊国, 赵旭. 基于投入产出方法的甘肃省水足迹及虚拟水贸易研究. *生态学报*, 2012, 32(20): 6481-6488.
- [20] 王长建, 汪菲, 张虹鸥, 张新林, 叶玉瑶, 吴旗韬, 金利霞, 李增. 广东省能源消费的动态演变及其驱动机制研究. *资源与产业*, 2019, 21(05): 9-19.
- [21] 王会娟, 夏炎. 中国居民消费碳排放的影响因素及发展路径分析. *中国管理科学*, 2017, 25(08): 1-10.
- [22] 李艳梅, 牛苗苗, 张红丽. 京津冀区域内增加值贸易的经济收益和隐含碳排放比较. *资源科学*, 2019, 41(09): 1619-1629.
- [23] Chen P, Alvarado V, Hsu S. Water energy nexus in city and hinterlands: multi-regional physical input-output analysis for Hong Kong and South China. *Applied Energy*, 2018, 225: 986-997.
- [24] 武娜, 沈镭, 钟帅, 胡纾寒, 张红丽, 周伟. 晋陕蒙能源富集区隐含的碳排放转移—基于投入产出模型的分析. *资源与产业*, 2019, 21(01): 32-38.
- [25] 光峰涛, 何永秀, 尤培培, 高效. 基于结构分解模型的中国电力消费驱动因素研究. *中国电力*, 2019, 52(12): 123-131.
- [26] Fang D, Hao P, Hao J. Study of the influence mechanism of China's electricity consumption based on multi-period ST-LMDI model. *Energy*, 2019, 170: 730-743.
- [27] Wang X, Wei Y, Shao Q. Decomposing the decoupling of CO2 emissions and economic growth in China's iron and steel industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 152: 104509.
- [28] 钱逸颖, 董会娟, 田旭, 余艳红, 陈异晖, 耿涌, 钟绍卓. 应对水资源危机的中国水足迹研究综述. *生态经济*, 2018, 34(07): 162-166.
- [29] 刘秀丽, 郭丕斌, 张勃, 郭淑芬, 贾毅. 采煤与脆弱生态复合区生态安全评价—以山西为例. *干旱区研究*, 2018, 35(03): 677-685.
- [30] 黄钰. 安徽省水—能耦合关系与作用机制研究. *南京大学*, 2019, 97.
- [31] 潘文卿, 李子奈, 刘强. 中国产业间的技术溢出效应: 基于 35 个工业部门的经验研究. *经济研究*, 2011, 46(07): 18-29.
- [32] Shao L, Guan D, Wu Z, Wang P, Chen G Q. Multi-scale input-output analysis of consumption-based water resources: Method and application. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 164: 338-346.
- [33] 中国投入产出学会课题组, 许宪春, 齐舒畅, 杨翠红, 赵同录, 刘轶芳, 满讲义. 国民经济各部门水资源消耗及用水系数的投入产出分析—2002 年投入产出表系列分析报告之五. *统计研究*, 2007, 24(3): 20-25.
- [34] 关爱萍. 南水北调工程受水区经济效应评价—以河南省为例. *中国地质大学学报(社会科学版)*, 2008(06): 29-36.
- [35] Ribau J O P, Sousa J O M C, Silva C M. Reducing the carbon footprint of urban bus fleets using multi-objective optimization. *Energy*, 2015, 93: 1089-1104.
- [36] 蔡振华, 沈来新, 刘俊国, 赵旭. 基于投入产出方法的甘肃省水足迹及虚拟水贸易研究. *生态学报*, 2012, 32(20): 6481-6488.
- [37] Dietzenbacher E, Kulionis V, Capurro F. Measuring the effects of energy transition: a structural decomposition analysis of the change in renewable energy use between 2000 and 2014. *Applied Energy*, 2020, 258: 114040.