

引用格式: 秦明慧, 刘秀丽. 海河流域产业用水量变化驱动因素分析[J]. 资源科学, 2024, 46(3): 621–634. [Qin M H, Liu X L. Driving factors for changes in sectoral water consumption in the Haihe River Basin[J]. Resources Science, 2024, 46(3): 621–634.] DOI: 10.18402/resci.2024.03.14

# 海河流域产业用水量变化驱动因素分析

秦明慧<sup>1,2</sup>, 刘秀丽<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 中国科学院数学与系统科学研究院, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院预测科学研究中心, 北京 100190; 4. 中国科学院大学数字经济监测预测预警与政策仿真教育部哲学社会科学实验室, 北京 100190)

**摘要:**【目的】为制定海河流域产业节水策略提供参考依据, 亟需系统辨识海河流域经济系统中细分产业用水量变化的主要驱动因素并量化其驱动作用。【方法】本文首先编制了2007、2012、2017年海河流域49个部门可比价水资源投入占用产出时间序列表, 以此为数据基础, 构建了包含11个驱动因素指标的海河流域细分产业用水量结构分解分析模型。【结果】①2007—2017年, 经济发展水平提高是促进海河流域用水总量增加的最主要原因, 但其驱动作用随时间减弱。生产用水强度降低和部门产品最终需求结构变化分别是2007—2012年和2012—2017年流域用水总量降低的最主要原因。②灌溉用水强度和部门产品最终需求结构分别是2007—2012年和2012—2017年农产品部门用水量降低的最主要因素。③生产用水强度对工业部门用水量变化的驱动作用随时间减弱, 对各工业部门产品最终需求的增长不断驱动工业部门用水量增加。④生产技术和最终需求总量结构变化对服务业部门用水量增加的驱动作用相较于农业部门和工业部门的驱动作用更强。【结论】2007—2017年, 海河流域用水量的减少呈现由生产用水强度驱动为主转向最终需求结构驱动为主的变化趋势。从产业间对比来看, 不同产业用水量变化的主要驱动因素存在明显产业特质性, 建议基于产业用水量变化的主要驱动因素区别制定各产业节水措施。

**关键词:** 驱动因素; 用水量; 结构分解分析; 投入占用产出表; 海河流域

DOI: 10.18402/resci.2024.03.14

## 1 引言

流域是以分水岭为地理界限的一种特殊区域, 它所具有的独特空间属性和区域功能持续有力推动经济发展, 从而形成了整体性较强、关联度较高的流域经济<sup>[1]</sup>。流域内各自然要素与社会经济因素联系紧密<sup>[2]</sup>, 特别是水资源要素, 其资源禀赋等自然条件常常天然依附于流域单位<sup>[3]</sup>。在此背景下, 从流域尺度实施水资源分配与管理政策的思想逐渐形成<sup>[4]</sup>。

海河流域是中国主要流域之一, 在中国社会经济发展中具有举足轻重的地位。随着海河流域近20多年的迅速发展, 前所未有的经济增长给流域稀

缺的水资源带来了更大的压力<sup>[5]</sup>。根据《2022年中国水资源公报》<sup>[6]</sup>, 2022年海河流域水资源总量为383.5亿m<sup>3</sup>, 仅为全国总量的1.4%, 远远低于长江流域的8590.5亿m<sup>3</sup>。流域年人均水资源量仅为214m<sup>3</sup>, 相当于全国平均水平的10%<sup>[7]</sup>。联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)定义年人均水资源量低于500m<sup>3</sup>为严重用水紧缺<sup>[8]</sup>, 据此标准, 海河流域已属于严重缺水区域。流域水资源禀赋差, 密集的人口、发达的经济带来强刚性用水需求, 水资源供需矛盾突出。为缓解流域水短缺压力, 政府部门相继提出多项节水措施与政策, 也通过“南水北调”等水利工

收稿日期: 2023-05-31 修订日期: 2023-12-10

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(E31Z060101); 国家自然科学基金项目(71874184); 国家自然科学基金基础科学中心项目(71988101)。

作者简介: 秦明慧, 女, 湖北荆州人, 博士研究生, 研究方向为水资源与经济协调发展。E-mail: 1208033745@qq.com

通讯作者: 刘秀丽, 女, 山东菏泽人, 研究员, 博士, 研究方向为环境经济学。E-mail: xiuli.liu@amss.ac.cn

程,从供给端增加可用水量。然而,仅依靠增加有限的供水量并不能完全有效解决流域缺水难题。经济系统中,产业发展与水资源利用之间存在明显相互促进和制约关系,减少产业用水量将有助于从需求端降低用水压力。为兼顾产业水资源综合管理效率和产业生产的经济效益,还需系统辨析细分产业用水量变化背后的主要驱动因素。

社会经济系统中各产业部门的用水量核算、驱动因素辨识与比较一直是区域水资源管理研究的热点问题之一。已有研究对不同层面(国家、省、市等)用水量变化的主要驱动因素进行了识别,并进一步量化分析了各驱动因素的驱动作用。从分解对象上看,现有文献较多从以下两个维度展开:一是以区域用水总量作为分解对象,并按农业、工业、生活用水进行分类分析<sup>[9,10]</sup>;二是单独对工业用水量变化进行探究<sup>[11,12]</sup>。以上研究中不仅缺少对服务业各部门的单独分析,且未能明确各细分产业用水量变化的主要驱动因素。为制定产业节水策略,还需进一步掌握细分产业用水量变化的主要驱动因素并量化其驱动作用。从方法上看,分解分析作为研究事物变化影响因素的一种分析框架被广泛应用<sup>[13]</sup>,其中结构分解分析(Structural Decomposition Analysis, SDA)与以对数均值迪氏分解法(Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI)为代表的指数分解分析两种方法最为常见,这两类方法都可保持分解变量之和与总量相等。指数分解分析具有对数据要求较低、使用方便、分解结果易于解释等优点,但往往只能针对单一产业进行分析,无法反映产业部门之间的关联关系。相比之下,SDA方法基于投入产出分析模型,能够弥补这一不足,提供更全面的分析结果。从驱动因素指标选择上看,早期研究更多关注经济规模、产业结构、最终需求、用水强度等一般性的综合性指标<sup>[14,15]</sup>。随着相关研究的深入,学者们意识到综合性指标通常代表多个指标的共同驱动作用,各独立的细化指标对用水量变化作用不一,可能是导致综合性指标的区域性差异的原因之一。为探究各独立因素具体的驱动作用,学者们开展了进一步的细化指标的驱动效应分析。如,张标等<sup>[16]</sup>和王凤婷等<sup>[17]</sup>均将最终需求进行了二次分解;张丽娜等<sup>[18]</sup>结合LMDI分解方法对产业结构效应进

行细分,并总结出产业高级化的驱动效应的时空差异;张陈俊等<sup>[19]</sup>则将人口因素分解为人口总量和各省区人口占比。上述研究为我们进行更全面的用水量变化的驱动因素分析提供了指标选取依据,但所选指标主要适用于用水总量变化分析,未有针对特定部门的细化指标。如对农产品部门而言,现有农业用水节水研究中所选取指标均集中于水生产力相关指标,如单位灌溉用水所得粮食产量等,忽略了宏观层面的水管理指标<sup>[20,21]</sup>。

总体看来,在当前大力推进流域经济系统发展的背景下,需在流域层面系统、深入探讨细分产业用水量变化的驱动因素及其驱动作用。现有产业用水量研究中,学者们多以区域用水总量或工业用水量整体为研究对象,尚少见在流域经济层面将灌溉用水效率等操作性指标与最终需求等宏观经济指标共同考虑在细分产业用水量变化的结构分解分析中并进行中长期跨年度的动态比较。为弥补以上不足,本文首先编制了2007、2012与2017年海河流域49个部门可比价水资源投入占用产出表,而后构建了包含灌溉用水强度、有效灌溉面积、生产技术水平、部门产品最终需求结构、最终需求总量结构等11个驱动因素的SDA模型,测算出各驱动因素对海河流域用水总量及49个产业部门和居民部门用水量变化的贡献率,由此系统辨识出各个细分产业用水量变化的主要驱动因素,并对结果做了在2007—2012年、2012—2017年两个时间段的动态分析和不同产业部门之间的对比分析。分析结果可为制定海河流域产业节水策略提供参考依据。

## 2 数据与方法

### 2.1 海河流域可比价水资源投入占用产出表的编制

投入产出分析方法是SDA方法的理论基础,投入产出表则是其重要的数据基础。为构建海河流域用水总量及细分产业用水量变化的SDA模型,本文首先编制了海河流域49个部门可比价水资源投入占用产出表(表1)。

与经典投入产出表一致,表1中 $Z=(Z_{ij})_{n \times n}$ 为中间投入(中间需求)矩阵, $Z_{ij}$ 表示第 $i$ 部门对第 $j$ 部门的中间需求或第 $j$ 部门对第 $i$ 部门的中间投入, $n$ 表示总部门数。 $X=(X_i)_{n \times 1}$ 为部门总产出向量,

2024年3月

表1 海河流域可比价水资源投入占用产出表

Table 1 The input-occupancy-output table with water resources of the Haihe River Basin at constant price

		产出		
		中间需求	最终需求	总产出
投入	中间投入	$Z$	$Y$	$X$
	最初投入	$V$		
	总投入	$X^T$		
占用	用水量	$W^I$	$W^H$	

注:本表采用投入产出表固定表式。表内各变量中, $Z$ 具有双重含义,同时与横向、纵向表头对应; $Y$ 、 $X$ 与横向表头对应; $V$ 、 $X^T$ 、 $W^I$ 、 $W^H$ 与纵向表头对应。

$X^T$  为部门总投入向量( $T$ 表示转置符号),  $Y=(Y_i)_{n \times 1}$  为部门最终需求向量,  $V=(V_j)_{1 \times n}$  为部门最初投入向量。以上变量间符合如下投入产出平衡式:

$$\sum_j Z_{ij} + Y_i = X_i, i, j = 1, \dots, 49 \quad (1)$$

$$\sum_i Z_{ij} + V_j = X_j, i, j = 1, \dots, 49 \quad (2)$$

式(1)表示对任意 $i$ 部门,其他部门对该部门产品的中间需求  $\sum_j Z_{ij}$  与经济系统对该部门产品的最终需求的总和为该部门的总产出  $X_i$ ,式(2)表示对任意 $j$ 部门,该部门产品对其他部门的中间投入  $\sum_i Z_{ij}$  与最初投入  $V_j$  的总和为该部门的总投入  $X_j$ 。对任一部门来说,都满足总投入与总产出相等。式(1)可用向量形式表示并进一步分解为:

$$X = AX + Y = (I - A)^{-1}Y = LY \quad (3)$$

式中:  $A=[a_{ij}]=[Z_{ij}/X_j]$  为直接消耗系数矩阵;  $I$  为单位对角矩阵;  $L=(I-A)^{-1}$  为完全需求系数矩阵矩阵。

基于投入占用产出分析理论<sup>[22]</sup>,占用部分为部门直接用水量向量  $W^I=(W_j^I)_{1 \times n}$  和居民用水量  $W^H$ ,其中  $W_j^I$  表示第 $j$ 部门的直接用水量。

由于中国每5年(逢2、7)编制基准年国家及各省份投入产出表,本文选取已发布的2007、2012、2017年海河流域内各省份(北京、天津、山东、河南、河北、山西、辽宁、内蒙古)42个部门投入产出表作为基础数据。根据海河流域行政区划,计算各省份流域内县区GDP总值占该省份GDP总值比例,将各省份42个部门投入产出表按此比例加总得到2007年、2012年和2017年海河流域42个部门投入产出表。综合考虑2007、2012与2017年42个部门

投入产出表的部门分类差异与研究需求,将农产品、电力、热力的生产和供应,水的生产和供应,水利、环境和公共设施管理,批发和零售,租赁和商务服务,住宿和餐饮等部门进行拆分整合,最终确定了如表2所示的49个部门,各部门分类解释与《2017年中国投入产出表》<sup>[23]</sup>一致。

进一步,按农产品生产价格指数、工业生产者出厂价格指数、居民消费价格指数、部门增加值指数分别将农业部门中间投入、工业部门中间投入、服务业部门中间投入、各部门增加值调整为以2007年为基准年的可比价数值以消除价格波动带来的误差<sup>[24]</sup>,相关价格指数数据来源于国家统计局。表1中占用部分用水量由流域用水总量拆分得到。流域用水总量分别来自2008、2013、2018年《中国水利统计年鉴》<sup>[25-27]</sup>,再根据2008年《中国经济普查年鉴》中“分行业水消费量”各部门水消费量占用水总量的比例拆分至各部门。

## 2.2 用水量变化的结构分解分析

### 2.2.1 指标选择与检验

结构分解分析方法基本原理是将因变量的变动分解为有关自变量的变动之和或乘积等形式,以测度各自变量对因变量变动影响程度的大小,其中自变量的选取至关重要。根据已有相关研究,经济发展水平、人口规模、生产技术水平、产业生产用水强度、部门产品最终需求结构、最终需求总量结构等指标被广泛证实与产业用水量息息相关,本文的分解模型中考虑了这些因素,并进一步将最终需求结构分解为部门产品最终需求结构和最终需求总量结构。另一方面,灌溉节水技术、有效灌溉面积、农业技术水平、城镇化率<sup>[28]</sup>、居民用水强度等指标对经济系统用水量变化存在一定驱动作用,故在理论上可作为用水量变化的结构分解分析模型中的自变量。在构建结构分解分析等计量模型前,还需对模型变量间相关性进行检验,避免共线性所导致的模型稳定性和准确性降低等问题。为保证本文模型有效性,分组对农业用水量  $W_1$ 、单位有效灌溉耕地的用水量  $dw_{11}$ 、有效灌溉面积占总耕地面积之比  $dw_{12}$ 、农产品部门单位总产出所占用的耕地面积  $dw_{13}$  和用水总量  $W$ 、城镇化率(城镇人口占比)  $pr_1$ 、城镇居民人均生活用水量  $pwh_1$ 、农村居民人均生活用水量  $pwh_2$  等指标进行相关性分析。因海河流域统



表2 海河流域可比价水资源投入占用产出表49个部门分类

Table 2 The 49 sectors in the input-occupancy-output tables with water resources of the Haihe River Basin at constant price

部门编号	部门名称	部门编号	部门名称
s1	农产品	s26	废品废料
s2	林产品	s27	金属制品、机械和设备修理服务
s3	畜牧产品	s28	电力及蒸汽热水生产和供应(不含水电)
s4	渔产品	s29	水力发电
s5	农、林、牧、渔服务	s30	燃气生产和供应
s6	煤炭采选产品	s31	供水与用水
s7	石油和天然气开采产品	s32	污水处理
s8	金属矿采选产品	s33	建筑
s9	非金属矿采选产品	s34	货物运输及仓储(不含水上运输)
s10	食品和烟草	s35	水上运输
s11	纺织品	s36	邮政
s12	纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品	s37	商业
s13	木材加工品和家具	s38	餐饮
s14	造纸印刷和文教体育用品	s39	信息传输,计算机服务和软件
s15	石油、炼焦产品和核燃料加工品	s40	金融保险
s16	化学产品	s41	房地产
s17	非金属矿物制品	s42	科学研究和技术服务
s18	金属冶炼及压延加工品	s43	水利管理
s19	金属制品	s44	环境和公共设施管理
s20	机械设备	s45	居民服务和其他服务
s21	交通运输设备	s46	教育
s22	电气机械和器材	s47	卫生和社会工作
s23	通信设备、计算机及其他电子设备	s48	文化、体育和娱乐
s24	仪器仪表	s49	公共管理、社会保障和社会组织
s25	其他制造产品		

计数据不完整,选取流域内用水量占比较大的五省(北京、天津、河北、山西、山东)2007—2017年相关数据计算Pearson相关系数。表3中的Pearson相关系数结果表明, $W_1$ 与 $dw_{11}$ 、 $dw_{12}$ 、 $dw_{13}$ 之间、 $W$ 与 $pr_1$ 、 $pwh_1$ 、 $pwh_2$ 之间均存在正相关关系,可进行进一步建模分析。此外, $pr_1$ 和 $pwh_2$ 之间存在一定相关关系,故进行进一步的格兰杰因果关系检验,检验结果如

表4所示, $pr_1$ 和 $pwh_2$ 之间互不为格兰杰原因。综上,保留 $dw_{11}$ 、 $dw_{12}$ 、 $dw_{13}$ 并分别记为驱动因素 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ ,保留 $pr_1$ 并与农村人口占比 $pr_2$ 共同构成驱动因素 $F_9$ ,保留 $pwh_1$ 、 $pwh_2$ 且合并为居民人均生活用水量向量 $pwh$ ,记为驱动因素 $F_{10}$ 。

### 2.2.2 模型构建

结合以上分析,借助SDA模型可灵活分解指

表3 Pearson相关系数

Table 3 Pearson correlation coefficients

	$W_1$	$dw_{11}$	$dw_{12}$	$dw_{13}$		$W^H$	$pr_1$	$pwh_1$	$pwh_2$
$W_1$	1				$W^H$	1			
$dw_{11}$	0.927**	1			$pr_1$	0.598*	1		
$dw_{12}$	-0.679*	-0.502	1		$pwh_1$	-0.602*	-0.543	1	
$dw_{13}$	0.644*	0.364	-0.132	1	$pwh_2$	0.735**	0.670*	-0.572	1

注: \*、\*\*分别表示 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ ,下同。

2024年3月

表4 格兰杰因果关系检验结果

Table 4 Results of Granger causality test

原假设H0	F 值	p 值	df1	df2
$pr_1$ 不是 $pwh_2$ 的格兰杰原因	1.394	0.347	2	4
$pwh_2$ 不是 $pr_1$ 的格兰杰原因	0.711	0.544	2	4

标,且保持分解变量之和与总量相等的优势,本文在构建模型时将11个因素指标考虑在内(表5),并通过以下过程解释模型在经济学上的合理性。模型构建过程如下。

在式(3)基础上,对最终需求向量 $Y$ 进一步拆分。根据投入产出分析理论, $Y_i$ 表示第 $i$ 部门的最终需求,最终需求总量 $\sum_i Y_i$ ,即按生产法计算的GDP,包含最终消费 $f_1$ 、资本形成总额 $f_2$ 和净调出 $f_3$ 三部分,即:

$$GDP = \sum_i Y_i = f_1 + f_2 + f_3, i = 1, \dots, 49 \quad (4)$$

最终需求总量结构向量由三部分占最终需求总量的比例刻画: $f = [f_1/GDP, f_2/GDP, f_3/GDP]^T$ 。记第 $i$ 部门最终消费、资本形成总额和净调出为 $y_{1i}, y_{2i}, y_{3i}$ ,部门产品最终需求结构向量 $B = [B_1, B_2, B_3]_{n \times 3} = [y_{1i}/f_1, y_{2i}/f_2, y_{3i}/f_3]_{n \times 3}$ 刻画了各部门最终需求占最终需求总量的比例。则最终需求向量 $Y$ 可分解为:

$$Y = B \times f \times p \times pGDP \quad (5)$$

式中: $p$ 、 $pGDP$ 分别表示人口规模与人均GDP。

海河流域用水总量 $W$ 为生产用水量 $W^I$ 与居民用水量 $W^H$ 之和,基于11项因素指标进一步分解为:

$$\begin{aligned} W &= e \times W^I + W^H \\ &= (e \times DW_{11} \times DW_{12} \times DW_{13} \times DW_2 \times L \times \\ &\quad B \times f \times pGDP + pwh \times pr) \times p \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $e = [1, 1, \dots, 1]$ 为49维求和向量; $pwh = (pwh_1, pwh_2)$ 为居民用水强度行向量, $pwh_1$ 、 $pwh_2$ 分别表示城镇、农村居民人均用水量; $pr = (pr_1, pr_2)^T$ 为城镇化率列向量, $pr_1$ 、 $pr_2$ 分别表示城镇、农村居民人口占总人口比例。单位有效灌溉面积用水量矩阵 $DW_{11}$ 、有效灌溉面积占比矩阵 $DW_{12}$ 、农业产出用地效率矩阵 $DW_{13}$ 和2-49部门单位产值用水量 $DW_2$ 由各部门单位产值用水量对角阵 $DW$ 分解得到,分解过程如下:

$$\begin{aligned} DW &= \text{diag}(dw) \\ &= \begin{bmatrix} dw_{11} & & \\ 1 & \ddots & \\ & 1 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dw_{12} & & \\ 1 & \ddots & \\ & 1 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dw_{13} & & \\ 1 & \ddots & \\ & 1 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dw_2 & & \\ & \ddots & \\ & & dw_{49} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

表5 用水量变动驱动因素<sup>(a)(b)</sup>

Table 5 Driving factors of water consumption change

驱动因素	指标	单位	符号	数据来源
灌溉用水强度	单位有效灌溉面积的用水量	m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup>	$F_1$	[25-27]、[29,30]
有效灌溉面积	有效灌溉面积占总耕地面积之比	%	$F_2$	[25-27]、[29,30]
农业产出用地效率	农产品部门单位总产出所占用的耕地面积	hm <sup>2</sup> /万元	$F_3$	[25-27]、[29,30]
产业生产用水强度	产业部门单位产值用水量对角阵(除农产品部门)	m <sup>3</sup> /万元	$F_4$	海河流域49部门可比价水资源投入占用产出表
生产技术水平	列昂惕夫逆矩阵	—	$F_5$	海河流域49部门可比价水资源投入占用产出表
部门产品最终需求结构	部门最终需求结构系数矩阵	—	$F_6$	海河流域49部门可比价水资源投入占用产出表
最终需求总量结构	消费、资本形成和净流调出占最终需求总量比例	—	$F_7$	海河流域49部门可比价水资源投入占用产出表
经济发展水平	人均GDP	万元	$F_8$	[25-27]、[29,30]
城乡结构	城镇化率	%	$F_9$	[25-27]、[29,30]
居民用水强度	居民人均生活用水量	m <sup>3</sup>	$F_{10}$	[25-27]、[29,30]
人口规模	总人口数	万人	$F_{11}$	[25-27]、[29,30]

(a) 在实际统计中,用水总量包括生产用水量、居民用水量和生态用水量,其中生态用水量主要受到宏观政策与历史气候变化影响,在本文不作考虑。本文所指用水总量为生产用水量和居民用水量之和。

(b) 2017年流域GDP、人口、城镇化率数据为本文根据流域内各省份2018年统计年鉴内相关数据综合计算而得。

式中:  $dw_j$  为  $j$  部门用水量  $W_j^1$  与  $j$  部门总产出  $X_j$  之比, 表示部门单位产值用水量。  $dw_j$  越小, 部门用水强度越低。进一步将  $dw_1$  进行分解为:

$$dw_1 = \frac{W_1^1}{X_1} = \frac{W_1^1}{eia} \times \frac{eia}{taa} \times \frac{taa}{X_1} = dw_{11} \times dw_{12} \times dw_{13} \quad (8)$$

式中:  $eia$ 、 $taa$  分别表示有效灌溉面积和总耕地面积。

$dw = [dw_1, \dots, dw_j, \dots, dw_{49}]^T$  为各部门单位产值用水量向量。为简化分解表达式, 用  $I_1 - I_{10}$ ,  $I_{11}$  替代式(6)中各变量符号, 记作:

$$W = (e \times I_1 \times I_2 \times I_3 \times I_4 \times I_5 \times I_6 \times I_7 \times I_8 + I_9 \times I_{10}) \times I_{11} \quad (9)$$

进行 SDA 分解时, 通常有保留交叉项、加权平均和两极分解法等不同形式, 其中两极分解法是取以第 0 期和第 1 期分别作为分解基期的分解结果平均值作为最终分解结果, 在驱动因素个数  $m > 2$  时, 可视为全部  $m!$  个分解结果平均值的近似解, 且计算过程更为简便。本文即采用两级分解法进行计算, 相邻两期直接用水量变化  $\Delta W$  可分解为以上 11 个指标带来的用水量变动  $\Delta WF_m$  之和, 即:

$$\Delta W = \sum_{m=1}^{11} \Delta WF_m \quad (10)$$

其中:

$$\Delta WF_m = \begin{cases} \frac{1}{2} \left\{ \left( \prod_{l < m} I_l^0 \right) \times \Delta I_m \times \left( \prod_{8 > l > m} I_l^1 \right) \times I_{11}^1 \right. \\ \left. + \left( \prod_{l < m} I_l^1 \right) \times \Delta I_m \times \left( \prod_{8 > l > m} I_l^0 \right) \times I_{11}^0 \right\}, m \leq 8 \\ \frac{1}{2} (\Delta I_9 \times I_{10}^1 \times I_{11}^1 + \Delta I_9 \times I_{10}^0 \times I_{11}^0), m = 9 \\ \frac{1}{2} (I_9^0 \times \Delta I_{10} \times I_{11}^1 + I_9^1 \times \Delta I_{10} \times I_{11}^0), m = 10 \\ \frac{1}{2} \left\{ \left( \prod_{l \leq 8} I_l^0 + I_9^0 \times I_{10}^0 \right) \times \Delta I_{11} \right. \\ \left. + \left( \prod_{l \leq 8} I_l^1 + I_9^1 \times I_{10}^1 \right) \times \Delta I_{11} \right\}, m = 11 \end{cases} \quad (11)$$

式中: 上标 0、1 分别表示上一期和当期。  $\Delta WF_m$  与  $\Delta W$  的比值 (单位: %) 称之为第  $m$  个指标  $F_m$  对用水量变化的驱动贡献率, 贡献率绝对值越大表示驱动因素对海河流域用水总量减少的驱动作用越大, 贡献率为正表示该因素驱动方向与用水量变化方向相同, 为负则代表驱动方向与用水量变化方向相反。

### 3 结果与分析

#### 3.1 海河流域用水总量变化的驱动因素分析

如图 1 所示, 2007—2017 年, 海河流域用水总量由 377.8 亿  $m^3$  下降至 336.1 亿  $m^3$ 。其中, 有效灌溉面积 ( $F_2$ )、经济发展水平 ( $F_8$ )、城镇化率 ( $F_9$ )、人口规模 ( $F_{11}$ ) 4 项因素共驱动用水总量增长 562.6 亿  $m^3$ , 而灌溉用水强度 ( $F_1$ )、产业生产用水强度 ( $F_4$ ) 等 7 项

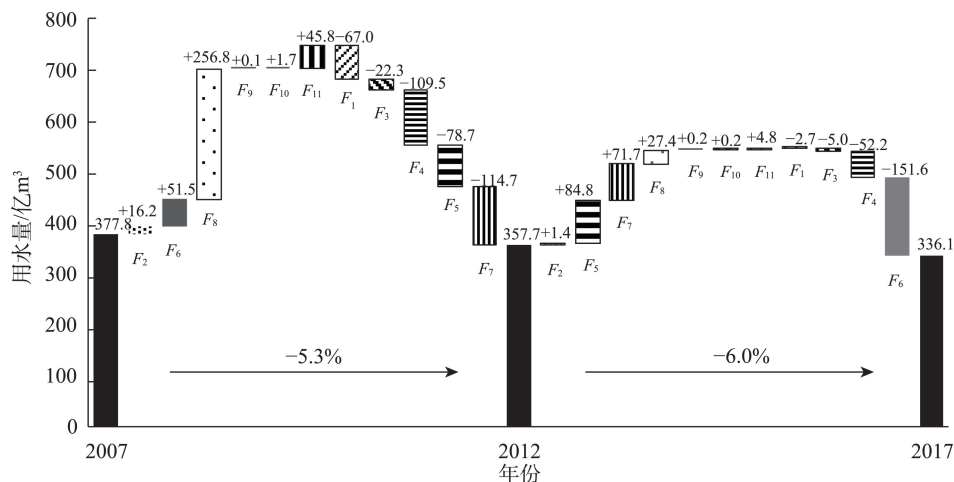


图 1 2007—2017 年海河流域用水总量变化的结构分解分析结果

Figure 1 Results of structural decomposition analysis of changes in total water consumption in the Haihe River Basin, 2007-2017

注: 图中 2007、2012、2017 所对应的黑色柱高度代表当年的海河流域用水总量, 两黑色柱之间的小柱体高度代表了不同驱动因素带来的用水总量变化, 柱体上端的数字为用水总量变化量, “+”代表用水总量增加, “-”代表用水总量减少。

2024年3月

因素共驱动用水总量减少604.3亿 $\text{m}^3$ 。

分时段来看,2007—2012年,经济发展水平( $F_8$ )的提高驱动用水总量增长约256.8亿 $\text{m}^3$ ,驱动作用超过其他因素,对流域用水总量减少的驱动贡献率达-1280%。这一阶段,促进海河流域用水总量减少的最主要因素为产业生产用水强度( $F_4$ )、最终需求总量结构( $F_7$ )和生产技术水平( $F_5$ )。其中, $F_4$ 与 $F_7$ 均驱动流域用水总量减少超过100亿 $\text{m}^3$ , $F_5$ 则驱动用水量减少了78.71亿 $\text{m}^3$ 。三者对用水量增长的抑制作用已超过 $F_8$ 对用水量增长的促进作用,最终使得海河流域用水总量下降5.3%。2012—2017年,经济发展水平( $F_8$ )、城镇化率( $F_9$ )的提高和人口规模( $F_{11}$ )的扩大仍对流域用水总量增长有一定促进作用,但驱动贡献率大大降低,说明此阶段海河流域粗放式发展模式已开始改变,经济、社会发展对水资源造成的压力有所减弱。随着耗水较少的服务业产品,尤其是以信息传输,计算机服务和软件( $S_{39}$ ),文化、体育和娱乐( $S_{48}$ )等部门为代表的数字经济相关产业占最终需求的比例增加,部门产品最终需求结构( $F_6$ )变化对促进用水总量减少产生了明显积极作用,共驱动用水总量下降151.6亿 $\text{m}^3$ ,贡献率为702%, $F_6$ 成为这一阶段促进海河流域用水总量减少的最主要因素。产业生产用水强度( $F_4$ )的驱动作用较2007—2012年有所降低,说明海河流域生产节水技术趋于成熟,在现有的技术条件下的生产节水潜力逐渐缩小。

### 3.2 海河流域细分产业用水量变化的驱动因素分析

为辨识出对海河流域细分产业用水量变化的主要驱动因素,选取各产业用水量变化驱动贡献率绝对值最高,即驱动作用最强的3项因素列出,结果如表6所示。总体看来,各细分产业用水量变化驱动作用前3的因素中出现频次最高的为产业生产用水强度( $F_4$ )、部门产品最终需求结构( $F_6$ )、经济发展水平( $F_8$ )。其中,经济发展水平( $F_8$ )对不同产业而言均是用水量增长的主要驱动因素,产业生产用水强度( $F_4$ )则是遏制用水量增长的主要驱动因素,部门产品最终需求结构( $F_6$ )对不同产业用水量变化的驱动作用方向不一。

分时段对比来看,各因素驱动作用排名出现明显变化,总体呈现经济发展水平( $F_8$ )对用水量增长的驱动作用减弱、部门产品最终需求结构( $F_6$ )对用

水量减少的驱动作用增强的变化趋势。2007—2012年间,经济发展水平( $F_8$ )对40个部门用水量增加的驱动作用排名前3。 $F_8$ 对10个部门用水量增加的驱动作用最强,其中5个为服务业部门。产业生产用水强度( $F_4$ )是对畜牧产品( $S_3$ )、煤炭采选产品( $S_6$ )等27个产业用水量变化驱动作用最强的因素,且其贡献率普遍在100%以上,说明这一阶段产业生产用水强度的降低在相关产业用水量变化中起明显主导作用。部门产品最终需求结构( $F_6$ )对19个部门用水量变化的驱动作用排名前3,是其中4个工业部门的最强驱动因素。2012—2017年,部门产品最终需求结构( $F_6$ )影响力显著增强,成为食品和烟草( $S_{10}$ )、纺织品( $S_{11}$ )等12个产业用水量变化的最主要驱动因素和木材加工品和家具( $S_{13}$ )、交通运输设备( $S_{21}$ )等15个产业用水量变化的主要驱动因素第2位。对各产业用水量变化贡献率排在前3位的因素还包括灌溉用水强度( $F_1$ )、生产技术水平( $F_5$ )和最终需求总量结构( $F_7$ )。由于不同产业用水量变化的主要驱动因素存在显著差异,以下按农业、工业、服务业分类,从中选择部分典型性产业部门进行了具体分析。

#### 3.2.1 农产品部门用水量变化的驱动因素分析

农产品部门( $S_1$ )生产用水量占流域用水总量比例超过10%,占比在所有部门中排前3位,同时 $S_1$ 也是用水量下降最多的部门之一,如图2所示,2007—2017年,农产品部门( $S_1$ )用水量以每5年约25%的速度稳定降低。其中,最终有效灌溉面积( $F_2$ )、最终需求结构( $F_6$ )、经济发展水平( $F_8$ )、城镇化率( $F_9$ )、人口规模( $F_{11}$ )5项驱动因素共驱动 $S_1$ 用水量增长61.5亿 $\text{m}^3$ ,而灌溉用水强度( $F_1$ )、农业产出用地效率( $F_3$ )等5项驱动因素共驱动用水量减少99.2亿 $\text{m}^3$ 。分时段来看,2007—2012年间,灌溉用水强度( $F_1$ )是促进农产品( $S_1$ )产业用水量减少的最主要因素,贡献率为143%。这一阶段,海河流域亩均灌溉用水量的降低主要得益于喷滴灌、微灌等节水灌溉技术的普及,其中河北、山西、山东等地节水灌溉面积均增长20%~30%,带来该产业用水量的大幅下降。但另一方面,随着农田灌溉水利工程建设,流域有效灌溉面积不断增加,促进了灌溉用水量增加。最终有效灌溉面积( $F_2$ )的增加促进农产品产业用水量增长约7.6亿 $\text{m}^3$ ,驱动贡献率为-35%。2012—

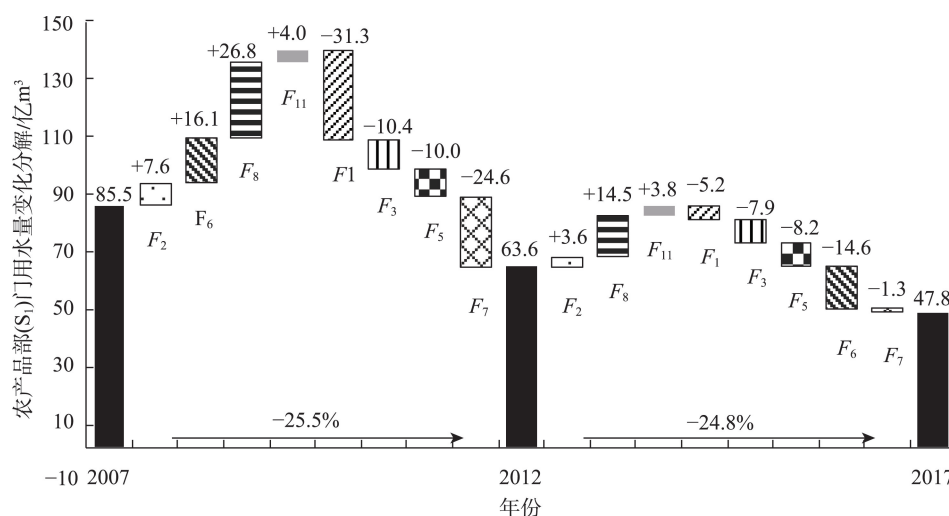
表6 2007—2017年细分产业用水量变化贡献率绝对值前3的驱动因素及其贡献率(%)

Table 6 Top three driving factors of the absolute contribution rate of water consumption by sector and their contribution rates, 2007-2017 (%)

部门代码	2007—2012年			2012—2017年		
	第1位	第2位	第3位	第1位	第2位	第3位
1	$F_1(143)$	$F_8(-123)$	$F_7(113)$	$F_6(94)$	$F_8(-92)$	$F_5(52)$
2	$F_5(146)$	$F_4(89)$	$F_8(-62)$	$F_7(108)$	$F_6(-81)$	$F_5(-16)$
3	$F_4(113)$	$F_8(-113)$	$F_7(87)$	$F_5(-110)$	$F_6(99)$	$F_7(96)$
4	$F_8(105)$	$F_7(-66)$	$F_6(50)$	$F_7(-108)$	$F_6(87)$	$F_4(86)$
5	$F_8(-117)$	$F_5(71)$	$F_4(50)$	$F_6(118)$	$F_4(-83)$	$F_7(40)$
6	$F_4(125)$	$F_7(-108)$	$F_8(-48)$	$F_4(63)$	$F_6(-51)$	$F_8(43)$
7	$F_4(100)$	$F_8(-96)$	$F_7(77)$	$F_6(143)$	$F_8(61)$	$F_7(-58)$
8	$F_5(62)$	$F_8(46)$	$F_4(-31)$	$F_5(-80)$	$F_8(63)$	$F_6(52)$
9	$F_4(-117)$	$F_5(99)$	$F_8(95)$	$F_6(112)$	$F_7(-73)$	$F_8(47)$
10	$F_4(102)$	$F_5(-80)$	$F_6(66)$	$F_6(125)$	$F_4(84)$	$F_7(-66)$
11	$F_4(128)$	$F_5(-88)$	$F_6(74)$	$F_6(104)$	$F_7(-54)$	$F_4(46)$
12	$F_4(58)$	$F_5(32)$	$F_7(25)$	$F_4(97)$	$F_6(83)$	$F_8(-69)$
13	$F_7(-108)$	$F_8(94)$	$F_4(57)$	$F_4(112)$	$F_6(-75)$	$F_8(-64)$
14	$F_8(-54)$	$F_7(44)$	$F_4(40)$	$F_4(103)$	$F_6(-62)$	$F_8(-61)$
15	$F_4(109)$	$F_8(-79)$	$F_6(-61)$	$F_4(-110)$	$F_8(81)$	$F_5(60)$
16	$F_8(116)$	$F_4(-115)$	$F_{11}(57)$	$F_4(117)$	$F_8(-71)$	$F_6(-16)$
17	$F_7(-86)$	$F_4(71)$	$F_8(48)$	$F_6(-109)$	$F_7(74)$	$F_4(73)$
18	$F_4(111)$	$F_8(-78)$	$F_7(55)$	$F_5(-112)$	$F_8(107)$	$F_4(50)$
19	$F_6(-116)$	$F_4(109)$	$F_7(67)$	$F_4(90)$	$F_8(-38)$	$F_6(-29)$
20	$F_4(169)$	$F_8(-55)$	$F_7(28)$	$F_8(128)$	$F_4(-82)$	$F_7(59)$
21	$F_4(139)$	$F_7(-67)$	$F_8(-38)$	$F_4(155)$	$F_6(120)$	$F_8(-110)$
22	$F_4(109)$	$F_8(-36)$	$F_6(22)$	$F_8(108)$	$F_6(78)$	$F_5(-73)$
23	$F_4(179)$	$F_8(-90)$	$F_6(71)$	$F_4(108)$	$F_8(-40)$	$F_5(35)$
24	$F_4(129)$	$F_7(76)$	$F_8(-50)$	$F_6(-104)$	$F_4(89)$	$F_5(54)$
25	$F_6(111)$	$F_5(-75)$	$F_5(32)$	$F_4(96)$	$F_8(-19)$	$F_5(-19)$
26	$F_8(63)$	$F_5(47)$	$F_4(-44)$	$F_6(-82)$	$F_7(77)$	$F_5(67)$
27	$F_6(113)$	$F_7(-99)$	$F_4(52)$	$F_6(104)$	$F_7(-81)$	$F_4(44)$
28	$F_4(-114)$	$F_8(106)$	$F_5(70)$	$F_7(94)$	$F_4(-63)$	$F_6(-62)$
29	$F_6(173)$	$F_7(-161)$	$F_4(65)$	$F_6(116)$	$F_7(-65)$	$F_4(-49)$
30	$F_4(101)$	$F_7(-84)$	$F_6(32)$	$F_4(49)$	$F_5(32)$	$F_8(20)$
31	$F_6(-80)$	$F_8(49)$	$F_5(45)$	$F_7(118)$	$F_6(-109)$	$F_4(-19)$
32	—	—	—	—	—	—
33	$F_4(106)$	$F_8(-70)$	$F_7(-45)$	$F_4(107)$	$F_6(-103)$	$F_7(73)$
34	$F_4(61)$	$F_7(50)$	$F_5(-31)$	$F_7(-135)$	$F_8(-103)$	$F_6(81)$
35	$F_4(118)$	$F_8(-59)$	$F_6(-25)$	$F_4(127)$	$F_6(123)$	$F_8(-68)$
36	$F_4(136)$	$F_6(-99)$	$F_7(-60)$	$F_4(-159)$	$F_6(-119)$	$F_5(119)$
37	$F_4(140)$	$F_7(119)$	$F_8(-100)$	$F_4(151)$	$F_6(-75)$	$F_8(-57)$
38	$F_8(85)$	$F_7(54)$	$F_5(-27)$	$F_5(108)$	$F_8(104)$	$F_4(-85)$
39	$F_4(120)$	$F_5(-78)$	$F_7(65)$	$F_4(-109)$	$F_8(64)$	$F_5(57)$
40	$F_4(147)$	$F_8(-113)$	$F_6(46)$	$F_4(-109)$	$F_8(74)$	$F_6(64)$
41	$F_4(115)$	$F_8(-55)$	$F_6(-11)$	$F_4(-99)$	$F_5(92)$	$F_8(80)$
42	$F_4(89)$	$F_8(-46)$	$F_7(40)$	$F_4(114)$	$F_8(-82)$	$F_7(-24)$
43	—	—	—	—	—	—
44	$F_4(49)$	$F_8(33)$	$F_6(30)$	$F_4(108)$	$F_8(-51)$	$F_5(-33)$
45	$F_8(-113)$	$F_4(110)$	$F_5(50)$	$F_4(137)$	$F_5(-70)$	$F_8(-44)$
46	$F_8(70)$	$F_4(-20)$	$F_7(-11)$	$F_8(91)$	$F_4(-70)$	$F_6(30)$
47	$F_8(79)$	$F_6(48)$	$F_5(-37)$	$F_4(-104)$	$F_6(74)$	$F_8(55)$
48	$F_4(116)$	$F_8(-22)$	$F_6(-15)$	$F_4(95)$	$F_8(-73)$	$F_6(62)$
49	$F_8(159)$	$F_6(-122)$	$F_7(53)$	$F_4(-110)$	$F_8(88)$	$F_7(81)$



2024年3月

图2 2007—2017年农产品( $S_i$ )产业用水量变化的结构分解分析结果Figure 2 Results of structural decomposition analysis of changes in water consumption of agricultural products ( $S_i$ ) production, 2007-2017

2017年,部门产品最终需求结构( $F_6$ )成为驱动农产品产业用水量变化的最主要因素。这一阶段,海河流域经济快速发展,人均可支配收入大幅提升,粮食作物消费占比不断降低,使得农产品部门最终需求占有所有产业部门最终需求的比例降低,驱动产业用水量减少约14.9亿 $m^3$ ,贡献率为94%。分时段对比结果显示,部门产品最终需求结构( $F_6$ )对海河流域农产品部门的节水促进作用逐渐凸显。因此,在进行传统农业节水建设,即提高农业用水灌溉效率的同时,可采用宏观经济调控政策促进农产品最终需求调节,作为降低农业用水量的补充手段。生产技术水平( $F_5$ )对 $S_i$ 产业用水量减少的驱动作用仅次于 $F_6$ 。说明这一阶段生产技术变动向着减少农产品投入的方向发展,最终有效驱动了 $S_i$ 产业用水量降低8.2亿 $m^3$ 。

### 3.2.2 部分典型性工业部门用水量变化的驱动因素分析

工业部门门类较多,不同产业部门间用水量及其驱动因素差异明显。如表6所示,涉及居民消费品的产业,如纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品( $S_{12}$ )和木材加工品和家具( $S_{13}$ ),其产业用水量受到经济发展水平( $F_8$ )的驱动作用较强;煤炭采选产品( $S_6$ )、金属冶炼及压延加工品( $S_{18}$ )等高耗水产业的用水量明显受产业生产用水强度( $F_4$ )驱动;而对水力发电( $S_{29}$ )、建筑( $S_{33}$ )等资本密集型产业来说,最终需

求总量结构( $F_7$ )是其产业用水量变化的主要驱动因素之一。一般性工业部门用水量变化主要受产业生产用水强度( $F_4$ )和部门产品最终需求结构( $F_6$ )驱动,且在2007—2012年与2012—2017年间存在显著差异。

以部分用水量变化较大的典型性部门为例,如图3所示,2007—2012年,对食品和烟草( $S_{10}$ )和纺织品( $S_{11}$ )产业来说,产业生产用水强度( $F_4$ )对它们用水量变化的驱动作用最强,贡献率分别为102%和128%。其原因是,2003—2006年,天津、北京等海河流域内省份陆续发布本省工业用水定额,形成生产用水微观管理标准。在相关条例指导下,流域内工业生产节水成果斐然,使得2007年后产业生产用水强度显著下降,大大促进了各工业产业用水量降低。同时,因固定资本形成总额占最终需求总量的比例从49.7%提高至56.2%,最终需求总量结构( $F_7$ )驱动机械设备( $S_{20}$ )和建筑( $S_{33}$ )等产业用水量增长,驱动作用排第3。2012年,金属制品( $S_{19}$ )最终需求占比较2007年提高了0.5个百分点,驱动产业用水量在2007—2012年增加了0.21亿 $m^3$ ,贡献率为-116%。2012—2017年,部门产品最终需求结构( $F_6$ )替代 $F_4$ 成为对 $S_{10}$ 和 $S_{11}$ 用水量变化驱动作用最强的因素。同时,在对各部门产品的最终需求中,石油和天然气开采产品、金属制品、非金属矿物制品、仪器仪表等工业制品占比攀升,部门产品最终

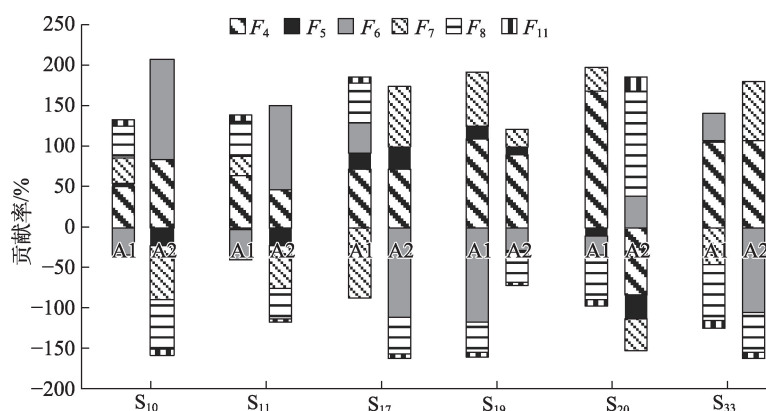


图3 2007—2017年部分典型性工业部门产业用水量变化驱动因素贡献率

Figure 3 Contribution rates of driving factors of industrial water consumption change in some typical industrial sectors, 2007-2017

注:图中A1、A2分别代表2007—2012、2012—2017年。下同。

需求结构( $F_6$ )不断促进对应工业产业用水量增长。如2017年非金属矿物制品( $S_{17}$ )最终需求占比较2012年提高了0.1个百分点,驱动产业用水量增加0.07亿 $m^3$ ,贡献率达-109%。

### 3.2.3 部分典型性服务业部门用水量变化的驱动因素分析

服务业各部门产业用水量变化的主要驱动因素呈现较明显的阶段性差异。如表6所示,2007—2012年间,所有服务业部门用水量变化驱动作用排名第1的因素均为经济发展水平( $F_8$ )或产业生产用水强度( $F_4$ )。此阶段海河流域经济发展迅速,由此引发服务业规模大幅扩张,促使产业用水量增加,经济发展水平( $F_8$ )成为驱动大部分服务业部门用水量增加的主要因素之一,仅有货物运输及仓储(不含水上运输)( $S_{34}$ )和邮政( $S_{36}$ )产业用水量变化驱动

作用前3的因素中不包含 $F_8$ 。在2012—2017年,生产技术水平( $F_5$ )和最终需求总量结构( $F_7$ )对服务业部门用水量变化的驱动作用明显增强。

以部分典型性服务业部门为例,如图4所示,2007—2012年, $F_8$ 分别促使餐饮( $S_{38}$ )和居民服务和其他服务产业( $S_{45}$ )用水量提高0.7亿 $m^3$ 和0.1亿 $m^3$ ,贡献率分别为85%和-113%。2012—2017年,最终需求总量结构( $F_7$ )对货物运输及仓储(不含水上运输)( $S_{34}$ )产业用水量增加的驱动作用最强,贡献率达135%,同时驱动邮政( $S_{36}$ )产业用水量增加119%,驱动作用仅次于产业生产用水强度( $F_4$ )。生产技术水平( $F_5$ )对信息传输,计算机服务和软件( $S_{39}$ )等服务业产业用水量增加也有较强驱动作用。其主要原因是,2012年以来,随着互联网技术的迅猛发展和普及,网络购物成为新的风尚,海河流域内运输、

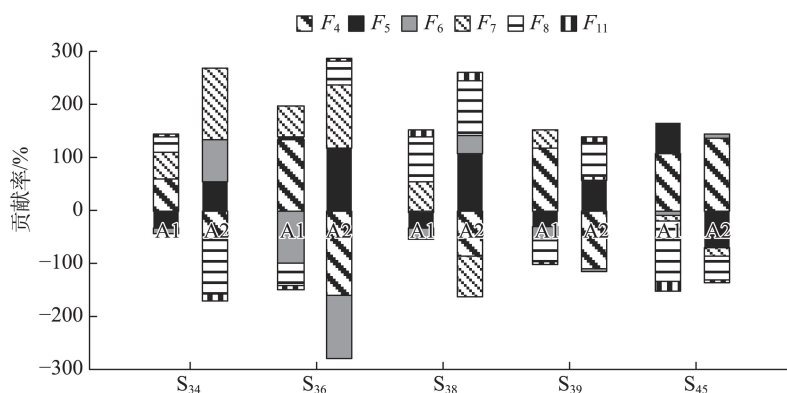


图4 2007—2017年部分典型性服务业部门产业用水量变化驱动因素贡献率

Figure 4 Contribution rates of driving factors of industrial water consumption change in some typical service sectors, 2007-2017

2024年3月

数字经济相关产业迅速发展,此类部门(如 $S_{36}$ 、 $S_{39}$ 等)对其他产业部门的中间投入所占比例大幅提高,引起了生产技术水平( $F_5$ )的变化,进一步改变了产业用水配置。与之形成对比的是,对大多数工业产业来说,生产技术水平( $F_5$ )的驱动作用较弱,且主要驱动方向为促使产业用水量减少。

## 4 讨论

本文构建了细分行业用水量变化的驱动因素分解分析模型,并应用于海河流域经济系统,得到了系列参考性结果。测算结果表明,经济发展水平( $F_8$ )提高对海河流域经济系统产业用水量的促增作用逐渐减弱,此趋势与章恒全等<sup>[9]</sup>对长江经济带用水量变化的研究结论一致。与单一行业用水量测算结果比较,Li等<sup>[31]</sup>的研究指出,煤电行业的节水潜力主要来自于产业生产用水强度的降低,本文测算结果亦表明,2007—2017年,产业生产用水强度( $F_4$ )的降低始终是电力及蒸汽热水生产和供应(不含水电)( $S_{28}$ )产业用水量降低的最主要因素。2012—2017年,部门产品最终需求结构( $F_6$ )和最终需求总量结构( $F_7$ )变化对 $S_{28}$ 的产业用水量的促增作用强于产业生产用水强度( $F_4$ )的促减作用,使得该部门产业用水量的增加。与已有研究不同的是:在农业用水量变化驱动因素研究中,已有文献<sup>[32-35]</sup>大多集中于对灌溉用水强度、经济发展水平、人口规模等因素的分析,且研究均表明灌溉用水强度下降是促进农业用水量减少的最主要因素。相较已有文献,本文增加了生产技术水平( $F_5$ )、部门产品最终需求结构( $F_6$ )、最终需求总量结构( $F_7$ )等因素的驱动作用分析,测算结果表明,2007—2012年,与其他文献结果一致,灌溉用水强度的降低大大减少了海河流域农产品部门产业用水量,而2012—2017年,部门产品最终需求结构( $F_6$ )变化和生技术水平( $F_5$ )进步是农产品部门产业用水量减少的最主要因素。根据Long等<sup>[36]</sup>对中国31个省份产业用水量变化的驱动因素分解分析,生产技术水平( $F_5$ )对产业用水量具有促减作用,且对农业部门作用最为显著,另一项对北京市2007—2012年产业用水量变化的驱动因素分解分析的结果却显示生产技术水平( $F_5$ )对产业用水量具有促增作用<sup>[17]</sup>,这一差别可能

来自于生产技术水平( $F_5$ )对细分产业用水量驱动方向的不同。根据本文细分产业的测算结果,生产技术水平( $F_5$ )对农业、工业产业用水量的驱动作用为用水量减少,但会驱动服务业部分产业,如信息传输,计算机服务和软件等产业用水量增加。相较其他省份而言,北京市服务业发展起步较早、产值占比较高,生产技术水平( $F_5$ )驱动服务业各部门产业用水量的增加超过了驱动其他产业用水量的减少。相较已有研究,本文模型更能反映用水量驱动因素的时间变化与产业差异,可为其他区域产业用水量变化驱动分析提高参考,测算结果可为制定海河流域细分产业节水的政策措施提供依据。本文基于历史数据,测算了不同时期不同经济社会指标变化对海河流域细分产业用水量变化的驱动力。在本文基础上,可结合指标变化与驱动作用力弹性,分析预测流域产业用水量变化趋势。这是本文所存在的不足之处,也是未来进一步深入研究的方向。

## 5 结论

本文结合投入产出分析理论与结构分解分析方法,构建了细分行业用水量变化的驱动因素分解分析模型,应用该模型系统测算了11个因素指标对2007—2012年、2012—2017年海河流域用水总量和49个产业用水量变化的贡献率。主要结论如下:

(1)2007—2017年,经济发展水平提高是驱动海河流域用水总量增加的最主要因素,但在2012—2017年间其驱动作用较2007—2012年间减弱。产业生产用水强度、最终需求结构变化等7项因素均驱动了海河流域用水量降低。其中,灌溉效率和产业生产用水强度的驱动作用相对减弱,部门产品最终需求结构和最终需求总量结构的驱动作用持续提升,说明海河流域用水量的减少呈现由生产用水强度驱动为主转向最终需求结构驱动为主的变化趋势。

(2)各部门产业用水量变化的主要驱动因素具有明显差异。农产品部门用水量下降主要受灌溉用水效率提高和最终需求占比下降而引起的部门最终产品需求结构变化驱动。工业各部门中,涉及居民消费品的产业受经济发展水平的驱动作用较

强,高耗水工业产业的用水量变化明显受产业生产用水强度驱动,对资本密集型工业产业来说,最终需求总量结构是其产业用水量变化的主要驱动因素之一。服务业部门用水量增长主要受经济发展水平、生产技术水平驱动,产业生产用水强度则是驱动服务业部门用水量下降的最主要因素。

(3)生产技术水平和最终需求总量结构变化对各部门驱动作用不一。从驱动作用方向上看:最终需求总量结构变化驱动机械设备、建筑等工业部门用水量增加,同时驱动服务业产业用水量下降,且其驱动作用随时间变化增强;生产技术水平变化驱动农业、工业部门生产用水量下降,却造成了服务业生产用水量增长。从驱动作用力上看:生产技术水平和最终需求总量结构变化对服务业部门用水量增加的驱动作用相较对农业部门和工业部门的驱动作用更加显著。

## 参考文献(References):

- [1] 宋敏,蔡婧瑜,任保平.新时代中国流域经济的理论体系与研究展望[J].中国软科学,2023,(3):96-107.[Song M, Cai J Y, Ren B P. Theoretical system and research prospect of river basin economy in China in the new era[J]. China Soft Science, 2023, (3): 96-107.]
- [2] Li X, Zhang L, Zheng Y, et al. Novel hybrid coupling of ecohydrology and socioeconomy at river basin scale: A watershed system model for the Heihe River basin[J]. Environmental Modelling & Software, 2021, DOI: 10.1016/j.envsoft.2021.105058.
- [3] 孙思奥,汤秋鸿.黄河流域水资源利用时空演变特征及驱动要素[J].资源科学,2020,42(12):2261-2273.[Sun S A, Tang Q H. Spatiotemporal patterns and driving factors of water resources use in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(12): 2261-2273.]
- [4] 余颖,刘耀彬.“自下而上”的环保治理政策效果评价:基于长江经济带河长制政策的异质性比较[J].资源科学,2023,45(6):1139-1152.[She Y, Liu Y B. The effectiveness of “bottom-up” environmental policies: A comparative analysis of heterogeneity of the River Chief System Policy in the Yangtze River Economic Belt [J]. Resources Science, 2023, 45(6): 1139-1152.]
- [5] Martinsen G, Liu S, Mo X, et al. Optimizing water resources allocation in the Haihe River Basin under groundwater sustainability constraints[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29: 935-958.
- [6] 中华人民共和国水利部.2022年中国水资源公报[R/OL]. (2023-06-30) [2023-12-10]. [http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/202306/20230630\\_1672556.html](http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/202306/20230630_1672556.html). [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China Water Resources Bulletin 2022[R/OL]. (2023-06-30) [2023-12-10]. [http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/202306/20230630\\_1672556.html](http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/202306/20230630_1672556.html).]
- [7] 王文生.持续用力加快推进海河流域地下水超采综合治理[J].中国水利,2021,(16):5-6.[Wang W S. Making continuous efforts to speed up control of groundwater over-exploitation in the Haihe River Basin[J]. China Water Resources, 2021, (16): 5-6.]
- [8] Du Y Y, Zhao D D, Qiu S J, et al. How can virtual water trade reshape water stress pattern? A global evaluation based on the meta-coupling perspective[J]. Ecological Indicators, 2022, DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109712.
- [9] 章恒全,杨柳,张陈俊.长江经济带用水量演变的驱动因素与预测:基于LMDI与SD模型[J].工业技术经济,2021,40(6):143-152.[Zhang H Q, Yang L, Zhang C J. Driving factors and prediction of water consumption evolution in the Yangtze River Economic Belt: Based on LMDI and SD Models[J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2021, 40(6): 143-152.]
- [10] 何凡,顾冰,何国华,等.中国用水量变化的驱动效应[J].南水北调与水利科技,2022,20(3):417-428.[He F, Gu B, He G H, et al. Driving effect evolution and spatial differentiation of water use change in China[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(3): 417-428.]
- [11] 卫玉杰,成金华,王然,等.河南省水资源消耗驱动因素和时空分异研究[J].绿色科技,2021,23(18):265-272.[Wei Y J, Cheng J H, Wang R, et al. Spatio-temporal analysis of driving factors of water resources consumption in Henan Province[J]. Journal of Green Science and Technology, 2021, 23(18): 265-272.]
- [12] 史珍,陆姝颖,嵇颖婕,等.中国工业用水量演变的驱动因素与节水路径[J].水利经济,2023,41(2):25-32.[Shi Z, Lu S Y, Ji Y J, et al. Driving factor of industrial water use evolution and water-saving pathway in China[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41(2): 25-32.]
- [13] 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.]
- [14] Zhi Y, Yang Z F, Yin X A, et al. Evaluating and forecasting the drivers of water use in a city: Model development and a case from Beijing[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2015, DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000548.
- [15] Duarte R, Pinilla V, Serrano A. Looking backward to look forward: Water use and economic growth from a long-term perspective[J]. Applied Economics, 2014, 46(2): 212-224.
- [16] 张标,刘秀丽.我国用水量变动影响因素的结构分解分析[J].管



2024年3月

- 理评论, 2015, 27(5): 3-8. [Zhang B, Liu X L. Structural decomposition analysis of impacting factors of China's water consumption changes[J]. Management Review, 2015, 27(5): 3-8.]
- [17] 王凤婷, 张倩, 吴锋. 产业转型发展下北京市社会经济系统用水变化及驱动因素[J]. 水利经济, 2019, 37(6): 13-20. [Wang F T, Zhang Q, Wu F. Variation laws and driving factors of water use of socioeconomic system in Beijing under industrial transformation [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(6): 13-20.]
- [18] 张丽卿, 曹逸文, 庞庆华, 等. 产业结构高级化对区域用水总量时空差异的驱动效应研究[J]. 软科学, 2020, 34(7): 1-7. [Zhang L N, Cao Y W, Pang Q H, et al. Driving effect of advanced industrial structure on spatio-temporal difference of regional water use [J]. Soft Science, 2020, 34(7): 1-7.]
- [19] 张陈俊, 章恒全, 陈其勇, 等. 中国用水量变化的影响因素分析: 基于LMDI方法[J]. 资源科学, 2016, 38(7): 1308-1322. [Zhang C J, Zhang H Q, Chen Q Y, et al. Factors influencing water use changes based on LMDI Methods[J]. Resources Science, 2016, 38(7): 1308-1322.]
- [20] Fernández J E, Alcon F, Diaz-Espejo A, et al. Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: A case study of a super high density olive tree orchard[J]. Agricultural Water Management, 2020, DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106074.
- [21] 吕苏榆, 崔冰燕, 李亚洁. 粮食主产区农业用水效率及其影响因素[J]. 水利经济, 2022, 40(3): 54-58. [Lv S Y, Cui B Y, Li Y J. Efficiency of agricultural water use and its influencing factors in main grain producing areas[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2022, 40(3): 54-58.]
- [22] Xiang X, Liu X L. Research on the economic and environmental impacts of China's seawater desalination industry with different technologies in the macroeconomic system[J]. Desalination, 2022, DOI: 10.1016/j.desal.2022.115734.
- [23] 国家统计局国民经济核算司. 2017年中国投入产出表[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019. [Department of the National Accounts, National Bureau of Statistics of China. Input-output Tables of China in 2017[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.]
- [24] 刘起运, 彭志龙. 中国1992-2005年可比价投入产出序列表及分析[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010. [Liu Q Y, Peng Z L. Analysis of Sequence Table of Input-output at Comparable Prices in China from 1992 to 2005[M]. Beijing: China Statistics Press, 2010.]
- [25] 中华人民共和国水利部. 2018中国水利统计年鉴[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China Water Conservancy Statistical Yearbook in 2018[M]. Beijing: China Water Resources and Hydro-power Press, 2018.]
- [26] 中华人民共和国水利部. 2013中国水利统计年鉴[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China Water Conservancy Statistical Yearbook in 2013[M]. Beijing: China Water Resources and Hydro-power Press, 2013.]
- [27] 中华人民共和国水利部. 2008中国水利统计年鉴[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China Water Conservancy Statistical Yearbook in 2008[M]. Beijing: China Water Resources and Hydro-power Press, 2008.]
- [28] 陈磊, 乔昌凯, 夏琳琳, 等. 广东省新型城镇化时期生活用水变化及驱动机制[J]. 南水北调与水利科技, 2021, 19(2): 273-280. [Chen L, Qiao C K, Xia L L, et al. Changes of domestic water consumption and its driving mechanism in the period of new urbanization of Guangdong[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(2): 273-280.]
- [29] 韩瑞光. 海河年鉴2016[M]. 天津: 天津出版传媒集团天津科学技术出版社, 2016. [Han R G. Haihe Yearbook 2016[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, Tianjin Publishing and Media Group, 2016.]
- [30] 韩瑞光. 海河年鉴2013[M]. 天津: 天津出版传媒集团天津科学技术出版社, 2013. [Han R G. Haihe Yearbook 2013[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, Tianjin Publishing and Media Group, 2013.]
- [31] 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.
- [32] 崔文怡, 邵孝候, 王浩. 安徽省三次产业主要行业用水量变化因素研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(7): 58-61. [Cui W Y, Shao X H, Wang H. Research on changing factors of water consumption of three major industries in Anhui Province[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(7): 58-61.]
- [33] 曾雯, 邱娅柳, 操信春. 基于水足迹和LMDI的江苏省农业用水变化驱动力研究[J]. 江苏水利, 2021, (12): 28-35. [Zeng W, Qiu Y L, Cao X C. Driving forces of agricultural water use change in Jiangsu Province based on water footprint and LMDI[J]. Jiangsu Water Resources, 2021(12): 28-35.]
- [34] Zou M Z, Kang S Z, Niu J, et al. A new technique to estimate regional irrigation water demand and driving factor effects using an improved SWAT model with LMDI factor decomposition in an arid basin[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 185: 814-828.
- [35] Zhang S L, Su X L, Singh P V, et al. Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) decomposition analysis of changes T in agricultural water use: A case study of the middle reaches of the Heihe River Basin, China[J]. Agricultural Water Management, 2018, 208: 422-430.
- [36] Long H Y, Xie R, Gao C, et al. Analysis of China's regional differences in water consumption based on spatial structural decomposition analysis model[J]. Science of the Total Environment, 2022, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157629.

## Driving factors for changes in sectoral water consumption in the Haihe River Basin

QIN Minghui<sup>1,2</sup>, LIU Xiuli<sup>1,2,3,4</sup>

(1. Academy of Mathematics and Systems Science, CAS, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Center for Forecasting Science, CAS, Beijing 100190, China; 4. MOE Social Science Laboratory of Digital Economic Forecasts and Policy Simulation at University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** [Objective] In order to provide a reference for the formulation of sectoral water conservation strategies for the Haihe River Basin, it is urgent to systematically identify the leading driving factors for changes in water consumption by sector in the Haihe River Basin economic system and quantify their driving effects. [Methods] First, a set of input-occupancy-output tables with water resources of 49 sectors of the the Haihe River Basin at constant price in 2007, 2012 and 2017 were compiled. Based on these tables, a structural decomposition analysis model of changes in sectoral water consumption with 11 driving factors was constructed. [Results] (1) From 2007 to 2017, the improvement of economic development level was the main reason for the increase of total water consumption, but its driving effect weakened with time. The decrease of industrial production water intensity and the change of final demand structure of sectoral products were the main reasons for the decrease of total water consumption during 2007- 2012 and 2012- 2017, respectively. (2) Irrigation water intensity and the final demand structure of sector products were the most important factors for the decrease in water consumption of agriculture during 2007-2012 and 2012-2017, respectively. (3) The driving effect of production water intensity on the change of water consumption in the industrial sectors weakened over time. The growth of final demand for products of industrial sectors continued to drive the increase of water consumption in the industrial sectors. (4) The change of the production technology level and the total final demand structure had a stronger driving effect on the increase of water consumption in the service sectors than in the agricultural sector and the industrial sectors. [Conclusion] From 2007 to 2017, the reduction of total water consumption in the Haihe River Basin showed a trend of change from being mainly driven by water conservation technology to being mostly driven by final demand structure. From the perspective of inter- industrial comparison, the main driving factors of water consumption change in different industries had obvious sectoral characteristics. We recommend to formulate water conservation measures for each industry based on its main drivers of water consumption change.

**Key words:** driving factors; water consumption; structural decomposition analysis; input-occupancy-output tables; Haihe River Basin