

中国区域水足迹及虚拟水贸易的时空演化路径

田旭 耿涌 吴瑞 许月*

摘要:水资源为中国区域经济发展提供源动力,深入识别消费侧水资源消耗对于区域水资源可持续管理以及经济发展进程中水资源危机应对具有重要意义。本文基于2012年和2017年中国多区域投入产出表,结合投入产出分析方法以及结构路径分析方法,揭示了消费侧各省份由最终需求引起的水资源消耗、虚拟水贸易以及水资源关键传导路径的特征及演化趋势。研究显示:相较于2012年,2017年中西部地区的居民消费、政府消费以及固定资产最终需求产生的水足迹增长趋势明显,并且省际净虚拟水进口的增长幅度较大;农业部门是各省份水资源消耗的关键部门;2017年各省份直接水资源消耗路径依赖其省份内传导趋势增强,间接水资源消耗路径较为多元化并且省际间关联作用较强。为实现水资源可持续管理,各省份相关部门应重点加强绿色化消费模式、高效的虚拟水贸易循环模式以及水资源关键传导部门产业链危机应对等方面的治理。

关键词:多区域投入产出;结构路径分析;虚拟水贸易;水足迹

一、引言

水资源是经济系统有序发展的重要保障(Aldaya et al., 2010; Wada et al., 2011)。然而,中国水资源空间分布不均衡、人均水资源偏低以及水资源利用效率低等现状为各省份经济系统

*田旭,上海交通大学国际与公共事务学院、上海交通大学-联合国工业发展组织绿色增长联合研究院,邮政编码:200030,电子信箱:tianxu@sjtu.edu.cn;耿涌(通讯作者),上海交通大学国际与公共事务学院、上海交通大学-联合国工业发展组织绿色增长联合研究院,邮政编码:200030,电子信箱:ygeng@sjtu.edu.cn;吴瑞,南京师范大学商学院,邮政编码:210046,电子信箱:rui.wu@njnu.edu.cn;许月,北京理工大学管理与经济学院,邮政编码:100081,电子信箱:18701825219@163.com。

本文是上海市浦江人才计划项目“贸易对上海市经济绿色低碳发展的影响研究”(2020PJC078);国家自然科学基金青年基金项目“中国对外商品贸易中隐含资源转移时空特征、影响因素及政策优化研究”(71704104)和国家自然科学基金重点国际合作项目“中国社会经济绿色低碳发展的规律研究”(71810107001)的阶段性成果。感谢匿名审稿人提出的宝贵意见。文责自负。

的发展带来了严峻的挑战(Jin & Young, 2001; Zhao et al., 2019; 邓楚雄等, 2020; 王圣云、林玉娟, 2021)。由此,明晰省域经济发展进程中水资源的供需矛盾对于各省份开展可持续水资源管理具有重要意义。

为了揭示水资源对中国经济系统的贡献和作用,近些年来研究学者尝试基于水足迹(即由地区的最终消费需求引起的直接和间接水资源的消耗(Hoekstra & Hung, 2002))与虚拟水(即生产端的生产商品中蕴含的水资源消耗(Allan, 1998))理论开展相关核算工作并取得了阶段性进展,主要包括以下几个方面:(1)国家尺度研究。基于投入产出分析,从消费视角整体上量化了中国2002年至2017年水足迹及虚拟水贸易情况,并识别了主要的驱动因素。研究结论指出中国经济系统的水资源消耗从2002年到2017年呈增长的趋势(Zhang & Anadon, 2014; Dong et al., 2014; Zhao et al., 2015; Chen et al., 2017; 孙才志、郑靖伟, 2021),居民消费拉动的水资源消耗较高(Tian et al., 2018; 孙才志、郑靖伟, 2021),收入增长是驱动水资源消耗增加的主要因素(Liao et al., 2021);此外,随着经济的发展,中国在对外贸易中虚拟水由净出口转为净进口(Chen et al., 2018; Tian et al., 2018)。(2)区域、省级以及城市尺度研究。从区域尺度来看,研究主要聚焦在河海流域的水足迹及其水资源的稀缺性(White et al., 2015)、水足迹空间分布不平等的驱动要素(Sun et al., 2017)、区域尺度虚拟水贸易研究(王勇, 2016)以及长江经济带虚拟水贸易问题(田贵良等, 2019)。从省级尺度来看,以往研究主要识别了中国30个省的水足迹及其虚拟水贸易(Zhang & Anadon, 2014; Dong et al., 2014; Chen et al., 2017)、虚拟水资源的稀缺性(Feng et al., 2014)、灰水足迹研究(Li et al., 2021)、共享社会经济路径下省份的水足迹预测研究(Xu et al., 2020)、消费侧水足迹的驱动因素分析(Sun & Fang, 2019; Xiong et al., 2020)、省份水足迹的行星边界问题(Li et al., 2020)、虚拟水贸易与比较优势理论关联研究(Zhao et al., 2019a)以及虚拟水贸易对节水影响(Zhao et al., 2018; Liu et al., 2019)等问题。此外,也有研究学者基于省份的2002—2015年投入产出表识别了云南(Qian et al., 2018)、山西(李方一等, 2012)以及天津(柳雅文等, 2016)的水足迹、用水效率及其驱动因素等相关问题。省级尺度研究的主要结论指出经济发达地区通过虚拟水贸易造成了经济不发达并且水资源稀缺地区严重的水资源负担。从城市尺度来看,研究主要聚焦在京津冀城市群水足迹研究(Zhao et al., 2017)以及中国特大城市及城市群的能源需求对于水足迹稀缺性的影响(Liao et al., 2019; Liao et al., 2020)等方面。(3)部门尺度研究。部门尺度研究旨在揭示产生水足迹的关键部门及其驱动要素。例如,研究指出2015年中国水足迹较高的部门为农业和建筑业(邓光耀, 2021)。经济的高速发展是引发水足迹升高的主要因素,而节水技术的发展及相关政策的完善对于降低部门水资源消耗强度起正向的拉动作用。

通过以上文献综述看出,以往水足迹和虚拟水研究多聚焦在宏观尺度,部门尺度研究较

为匮乏(Zhao et al., 2019b; 邓光耀, 2021; 孙才志、郑靖伟, 2021), 并且鲜有研究识别区域间虚拟水关键部门传导路径的时空演化趋势。对于中国而言, 目前国际形势错综复杂, 区域间贸易在省份未来的可持续资源供应方面将发挥重要作用。科学识别区域间虚拟水关键部门传导路径的时空演化趋势将有助于各省份明晰耗水的关键路径, 为区域间节水政策的有效制定提供支撑。此外, 新冠疫情为区域间产业链的供应安全拉响了警钟, 由此识别区域间虚拟水关键部门传导路径的时空演化趋势也有助于省份应对潜在的水资源危机。

本文基于中国2012年以及最新的2017年的多区域投入产出表, 结合投入产出分析方法开展中国30个省份水足迹及虚拟水贸易核算研究, 宏观上揭示各省份不同最终使用结构引起的水资源需求以及区域间虚拟水转移格局; 依托结构路径分析方法重点识别区域间消费侧水资源消耗关键路径的特征及演化趋势, 相关结果为后疫情时代省级经济系统水资源可持续供应与管理提供参考, 为推进中国“双循环”及“双碳”目标建设提供启示。

二、省域水足迹及虚拟水贸易测算

(一) 多区域水足迹及虚拟水贸易核算测度方法

虚拟水的概念最初由学者Allan于1993年提出, 旨在表征生产端蕴含在商品和服务中的水资源含量。研究学者将虚拟水概念应用于商品贸易进而表征贸易中虚拟水的流动情况, 为区域水资源管理提供支撑(Aldaya et al., 2010; Chen et al., 2017; Tian et al., 2018)。基于虚拟水概念, 学者Hoekstra和Hung(2002)提出水足迹概念并用于表征为了满足地区的最终消费需求引起的直接和间接水资源消耗的总量。根据研究需要, 研究学者也将水足迹区分为蓝水足迹、绿水足迹以及灰水足迹等(Chapagain & Hoekstra, 2006)。

水足迹的核算方法主要包括“自下而上”以及“自上而下”两类, 其中, “自下而上”主要基于商品虚拟水含量及其重量核算商品的水足迹, 进而通过商品的线性追踪用于核算某一产业链或区域的水足迹。该方法通常适用研究尺度较小的单一商品的案例区域, 但其在表征区域或产业间关联方面比较欠缺。以投入产出分析为代表的“自上而下”的水足迹核算方法是应用比较成熟的用于识别产业间及区域间水资源消耗关联的研究方法, 根据研究对象不同可开展单区域以及多区域的水足迹核算研究。“自上而下”的研究方法不仅可以追踪水资源在不同产业间的流动情况, 并且可以清晰地刻画区域的不同最终需求结构对水资源消耗的影响, 为区域的可持续水资源管理提供有益支撑。本文采用中国碳核算数据库——CEADS团队编制的2012年和2017年中国多区域投入产出表开展水足迹及贸易虚拟水的核算研究(Zheng et al., 2020)。

本文基于多区域投入产出表, 构建省份水足迹及虚拟水贸易核算模型, 核算框架见表1。由于部门用水数据的可获得性, 本文将各省份的42部门归并为37部门, 相关信息见附表1。

表 1 多区域投入产出模型

投入		产出		中间需求			最终使用			总产出
				省份 1	...	省份 t	省份 1	...	省份 t	
		部门 1...n	...	部门 1...n						
中间投入	省份 1	部门 1...n	Z^{11}	...	Z^{1t}	Y^{11}	...	Y^{1t}	X^1	
	
	省份 t	部门 1...n	Z^{t1}	...	Z^{tt}	Y^{t1}	...	Y^{tt}	X^t	
增加值			V^1		V^t					
总投入			X^1	...	X^t					

根据多区域投入产出模型可知,假设共有 t 个省份 n 个部门。依据投入产出表的平衡关系,可得在省份 r 发生生产活动时的投入产出平衡关系为:

$$X^r = A^{rr} X^r + Y^{rr} + \sum_{s \neq r} A^{rs} X^s + \sum_{s \neq r} Y^{rs} \quad (1)$$

上式中: X^r 代表省份 r 的总产出列向量, A^{rr} 代表省份 r 的直接消耗系数矩阵, A^{rs} 代表省份 r 出口到省份 s 的中间产品直接消耗系数矩阵, Y^{rr} 代表省份 r 的最终使用列向量,主要包括居民消费、政府消费和资本形成。 Y^{rs} 代表省份 r 出口到省份 s ($s \neq r$) 的最终产品。直接消耗系数 a_{ij} 为:

$$a_{ij} = \frac{z_{ij}^{rr}}{x_j^r} \quad (2)$$

上式中: z_{ij}^{rr} 为省份 r 的部门 i 向部门 j 的中间投入, x_j^r 为省份 r 的部门 j 的总产出。

通过最终整理,投入产出的平衡关系为:

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

参考Tian 等(2018),省份 r 的水足迹 W_r 表示为:

$$W_r = M(I - A)^{-1} Y_r \quad (4)$$

上式中: M 为直接用水系数矩阵, I 为单位矩阵, Y_r 为省份 r 的最终需求,部门 i 的直接用水系数 m_i 为:

$$m_i = \frac{w_i^r}{x_i^r} \quad (5)$$

上式中: w_i^r 代表省份 r 部门 i 的水资源消耗量。

区域的虚拟水贸易平衡 T_b 为:

$$T_b = W_{ex} - W_{im} \quad (6)$$

上式中: W_{ex} 和 W_{im} 分别代表省际的出口和进口虚拟水资源。

(二)结构路径分析

结构路径分析(Structural Path Analysis, SPA)用于在投入产出分析表中刻画最终使用需

求引起的某种要素在产业间的传导特征,进而反映上下游产业间关联程度(Lenzen, 2007)。结构路径分析旨在通过逐级分解完全消耗系数进而识别最终使用需求在每一层级产生的要素消耗情况(Wood & Lenzen, 2009)。

针对本文而言,省份的水足迹 W_r 可分解为:

$$W_r = M(I-A)^{-1}Y = MIY + MAY + MA^2Y + \dots + MA^nY \quad (7)$$

上式中: MA^nY 代表来自第 n 层传导路径的影响。结构路径分析是一个无穷的分解,由于直接消耗和前两次间接消耗涵盖了大部分水足迹,本文将其分解至第二层级 MA^2Y 。

(三)数据来源

本文的基础数据包括2012年和2017年的中国多区域投入产出表。本研究包括30个省份(不含港澳台及西藏地区)。由于分部门的用水数据统计缺失,研究年份的各省份分部门用水数据的处理是难点。本文参考以往研究,对本研究中的部门用水数据处理作如下说明:农业部门用水数据来自于各省份发布的2012年和2017年度的《水资源公报》;研究年份的各省份工业部门的总体用水数据来自于各省份发布的2012年和2017年度的《水资源公报》,但由于本文需获取投入产出表中的分工业部门用水数据,由此工业部门用水数据的分配比例的原始数据来源于《2008年中国经济普查年鉴》,在此基础上参考Zhang等(2014)、Chen等(2017)进行处理,进而获取各省份分工业部门的用水数据;建筑业的用水数据在2011年度的《全国第一次水利普查》数据的基础上基于2012年和2017年《中国统计年鉴》中建筑行业的产值增长率进行了调整,从而得到研究年份的用水数据;服务业总体的用水数据是在2011年度的《全国第一次水利普查》数据的基础上基于2012年和2017年《中国统计年鉴》中服务业的产值增长率进行了调整,分部门服务业的用水数据基于2012年和2017年的中国多区域投入产出表中服务行业用水比例并结合服务行业总体用水数据进行调整。

三、实证结果与分析

(一)2012年和2017年各省份水足迹及其构成情况

如图1所示,2012年和2017年水足迹较高的省份主要包括经济体量和人口密度较高的东部沿海省份江苏和广东、中国重要的商品粮基地湖北和湖南以及中国重要的农产品生产基地新疆。以2017年为例,这些省份水资源消耗占全国水资源消耗的比例分别为8.6%、7.0%、5.9%、5.5%以及5.7%。

相较于2012年,全国70%省份的水足迹在2017年呈现增长的趋势,其中增长幅度较大的省份为陕西、安徽和山西,其水足迹分别增长55.3%、53.5%以及43.5%。相较于2012年,经济发达省份例如上海、山东和北京,其2017年水足迹呈下降趋势,分别下降约72.8%、41.2%以及25.8%。从省份最终需求的增长趋势看出,虽然东部地区的水资源消耗体量较大,但中西部地

区最终需求引起的水资源消耗的增长趋势较为明显。由此,中西部地区未来经济增长与水资源消耗脱钩问题应引起相关部门的重视。

通过图1中各省份水足迹构成比例可以看出,2012年和2017年分别有33%和43%的省份需依赖省际调入虚拟水资源商品满足其当地的最终水资源需求,这种趋势多集聚在经济发达省份,例如上海、广东、浙江等。相较而言,新疆、湖北以及湖南等省份的水资源消耗主要依赖于其省份内水资源。

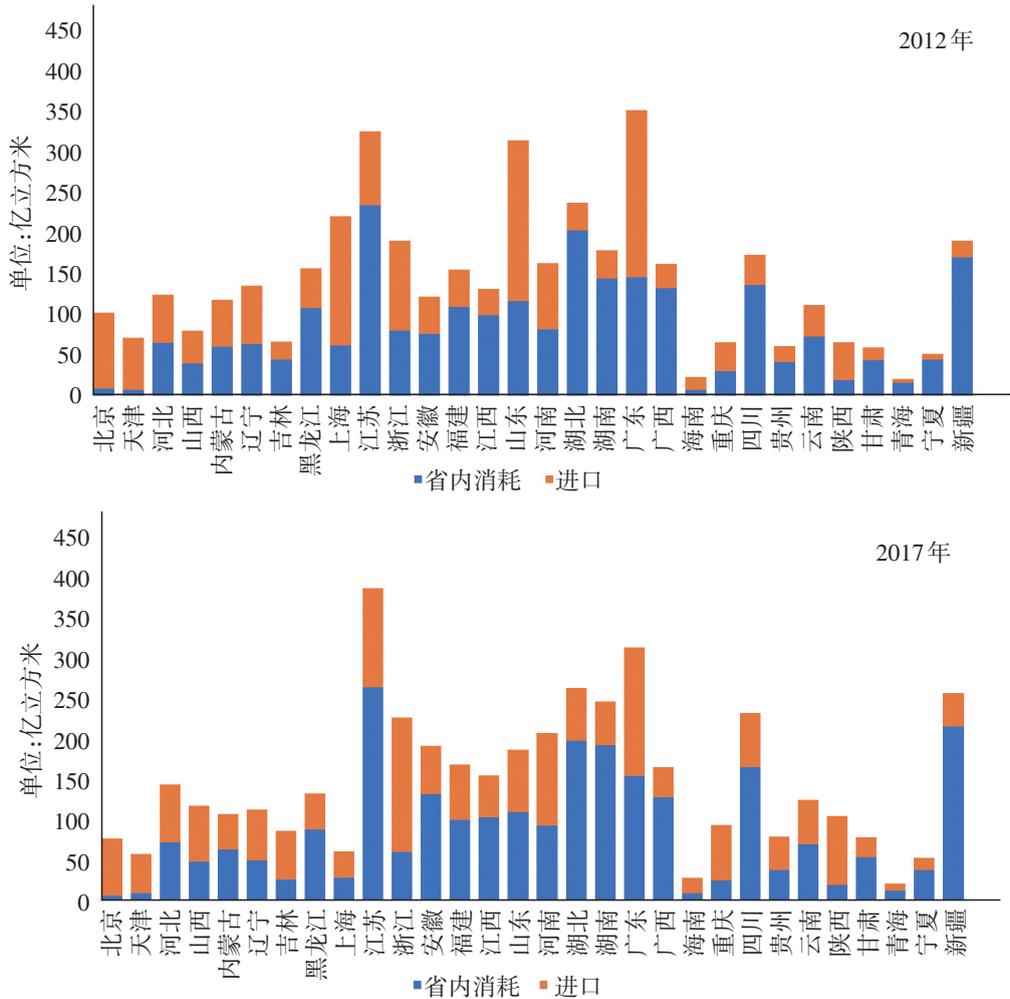


图1 2012年和2017年中国各省份水足迹

图2展示了各省份水资源的最终使用结构。结果显示2012年和2017年各省份最终使用占比较高的组分是居民消费和省际调出。2012年,全国40%的省份其水资源最终消耗主要用于居民消费(代表性省份为宁夏和山西),60%的省份主要用于省际调出(代表性省份为海南和安徽)。2017年,省际调出变化明显,全国大约70%的省份水资源消耗主要用于省际调出(代表性省份为吉林和黑龙江)。

相较于2012年各省份水资源的最终使用来看,2017年各组分呈现不同程度的变化。对

于居民消费、政府消费以及固定资产来说,中西部地区的增长趋势明显。对于省际调出来,东部沿海省份(例如广东)增长趋势明显。

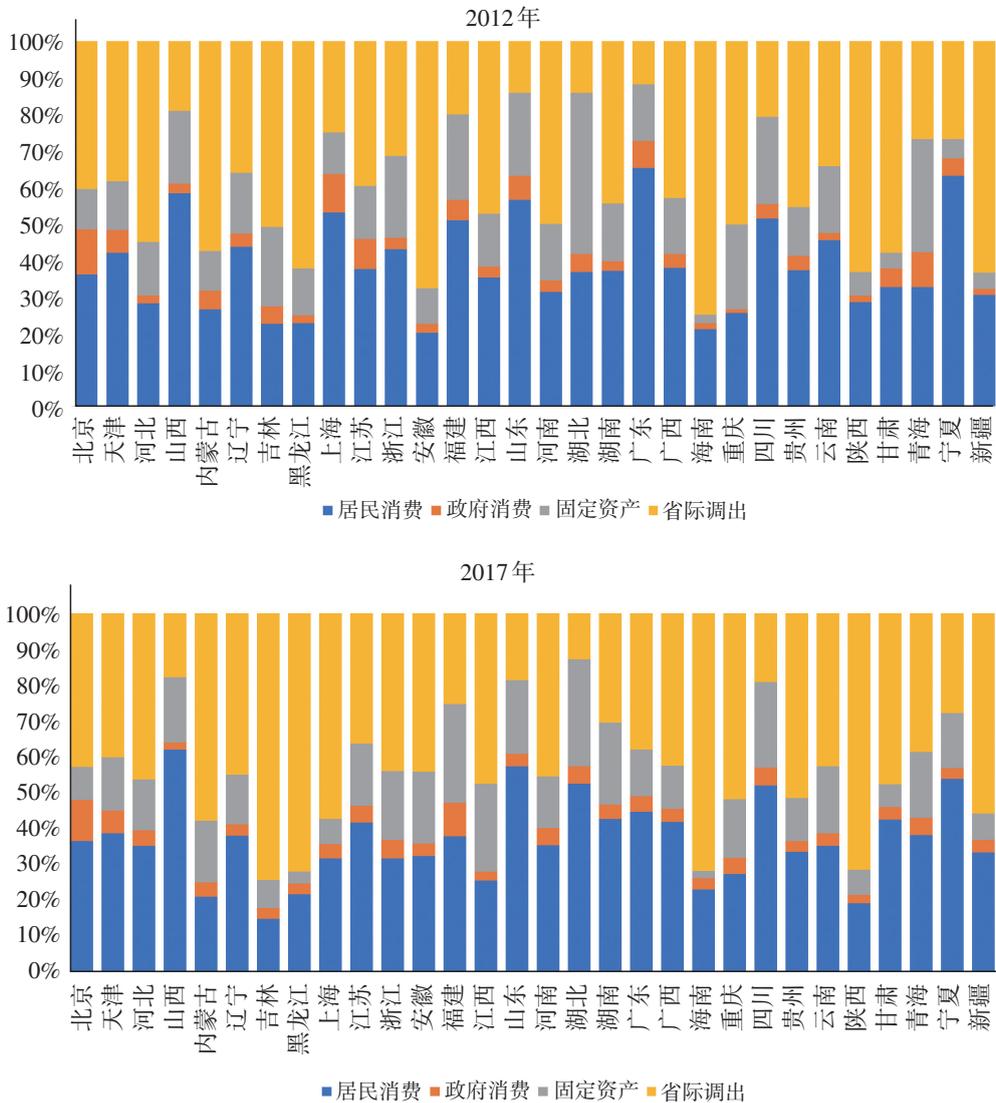


图2 2012年和2017年中国各省份水资源的最终使用结构

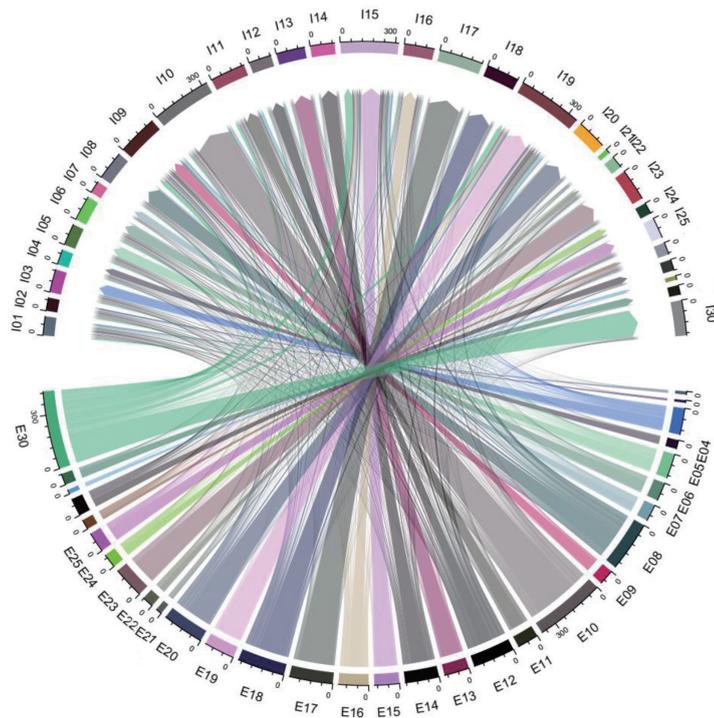
(二) 省际贸易中虚拟水转移情况

图3展示了2012年和2017年省际贸易中虚拟水的转移情况。总体而言,中国大约47%的省份在省际贸易中保持净进口虚拟水趋势,其中量值较大的省份是经济发达并且人口密度高的东部沿海省份例如浙江以及广东;大约40%的省份保持净出口虚拟水趋势,其中量值较大的省份是中国重要商品粮基地的黑龙江、新疆、广西和内蒙古。

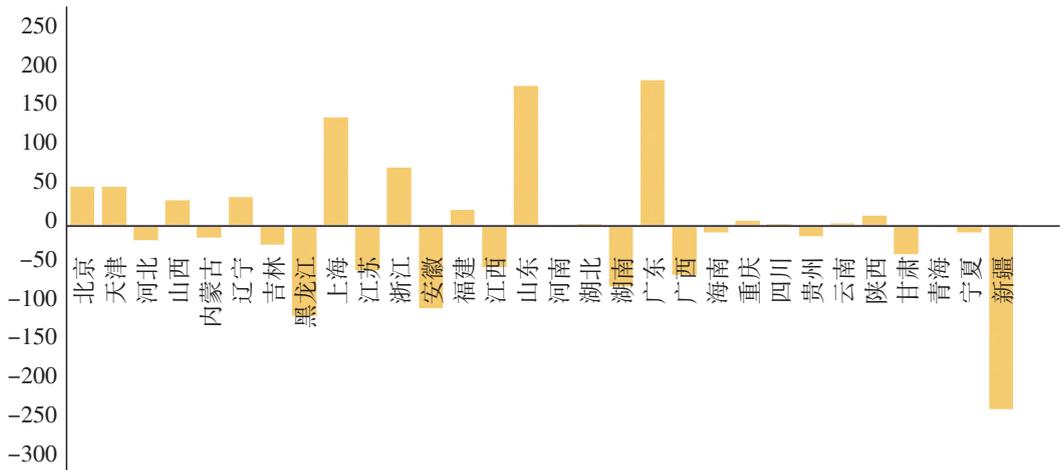
对于省际贸易中净进口虚拟水省份而言,相较于2012年,2017年呈净进口虚拟水增长趋势的省份主要聚焦在中西部地区,净增长幅度最大的省份是河南、湖北和四川。对于净出口

虚拟水省份而言,内蒙古和黑龙江的增长幅度较大,相较于2012年,2017年其净虚拟水出口分别增长145%和51%。

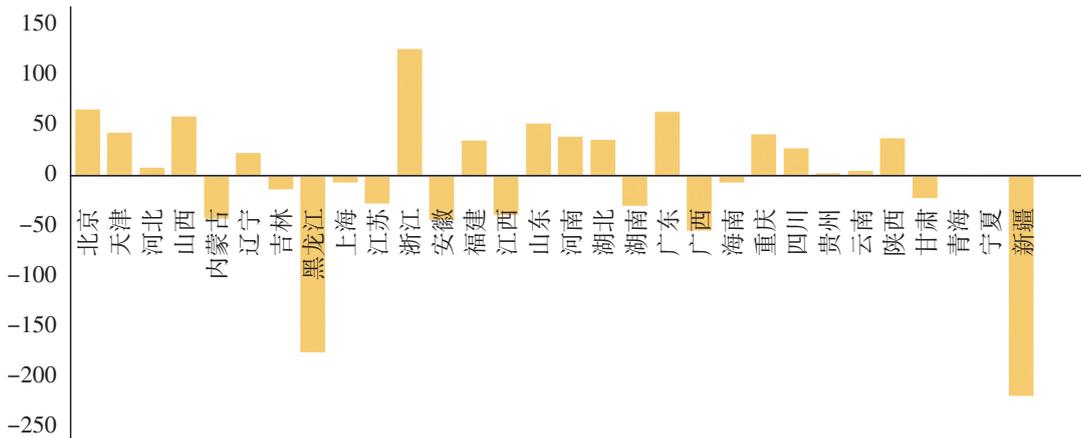
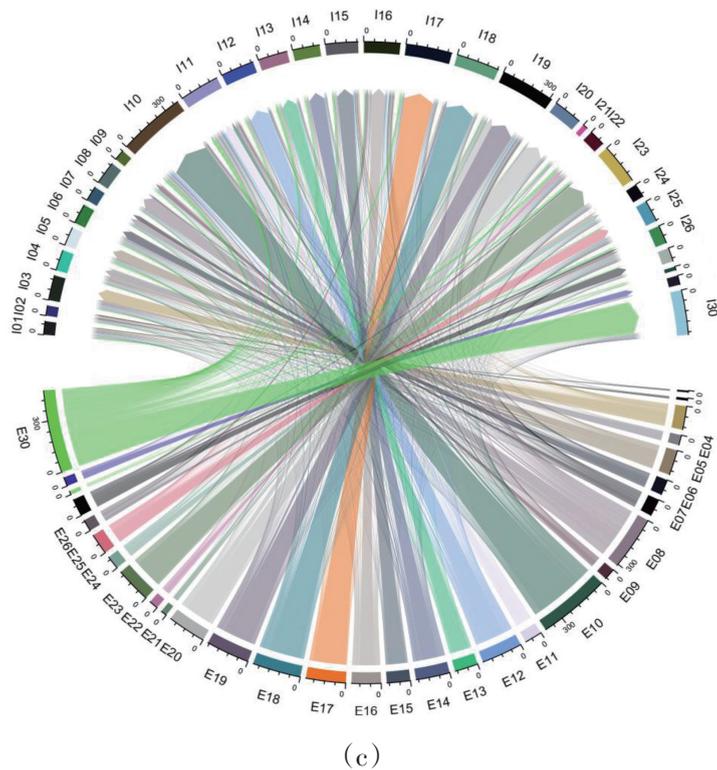
通过上述结果看出,虚拟水贸易的转移格局与中国水资源禀赋的分布有出入,例如水资源稀缺的新疆和内蒙古地区是省际虚拟水的主要出口省份,而水资源丰富的浙江和广东地区是省际虚拟水的主要进口省份。由此可以看出,水资源禀赋与虚拟水贸易转移格局之间的关联机制还存在较大的不确定性,而这些潜在的不确定性可能是缓解省份水资源压力并避免虚拟水贸易不平等交换的重要内容。



(a)



(b)



(d)

注：图3-a和图3-c展示省际间虚拟水转移，省份代码见附表1，其中I表示进口，E表示出口，省份编号顺时针排列。图3-b和图3-d展示净虚拟水变化，其中X轴上方正值表示净进口，下方负值表示净出口。

图3 2012年和2017年省际贸易中虚拟水的转移情况

(三) 各省份水资源消耗的关键部门路径分析

区域间虚拟水资源的直接和间接传导路径对于省份的水资源供应安全具有一定的启示作用。图4展示了2012年和2017年各省份直接和间接水资源占水足迹比例的总体情况。省份平均的直接水资源消耗占总水足迹的比例(A1)数值在31%左右，其中A1较低的省份是河南和陕西。相较于2012年，2017年中国有1/2的省份A1下降，其中下降幅度最大的是青海

省;在A1上升的省份中,内蒙古的上升幅度较为显著。根据虚拟水资源的部门结构路径的计算公式,省份的水足迹是由直接水资源消耗以及若干次的间接水资源消耗构成。因此,如果省份的A1较小,该现象说明省份需要通过较高比例的间接水资源路径传导来满足其最终的水资源需求。而间接水资源路径传导涉及的区域间部门的关联较为复杂,由此会增加该省份的水资源供应的不确定性。

省份的直接水资源消耗与两层级间接水资源消耗之和占省份总水足迹的比例(A2)显示,省份平均的A2数值在70%左右,其中陕西和河南的A2数值相对较低;相较于2012年,2017年山东省的A2数值下降幅度最大。上述结果也进一步反映了省份的水资源供应安全问题,如果A2数值相对较小,意味着为了满足省份的最终需求还需要发生更多层级的间接水资源路径传导,由此也增加了水资源供应的不确定性。

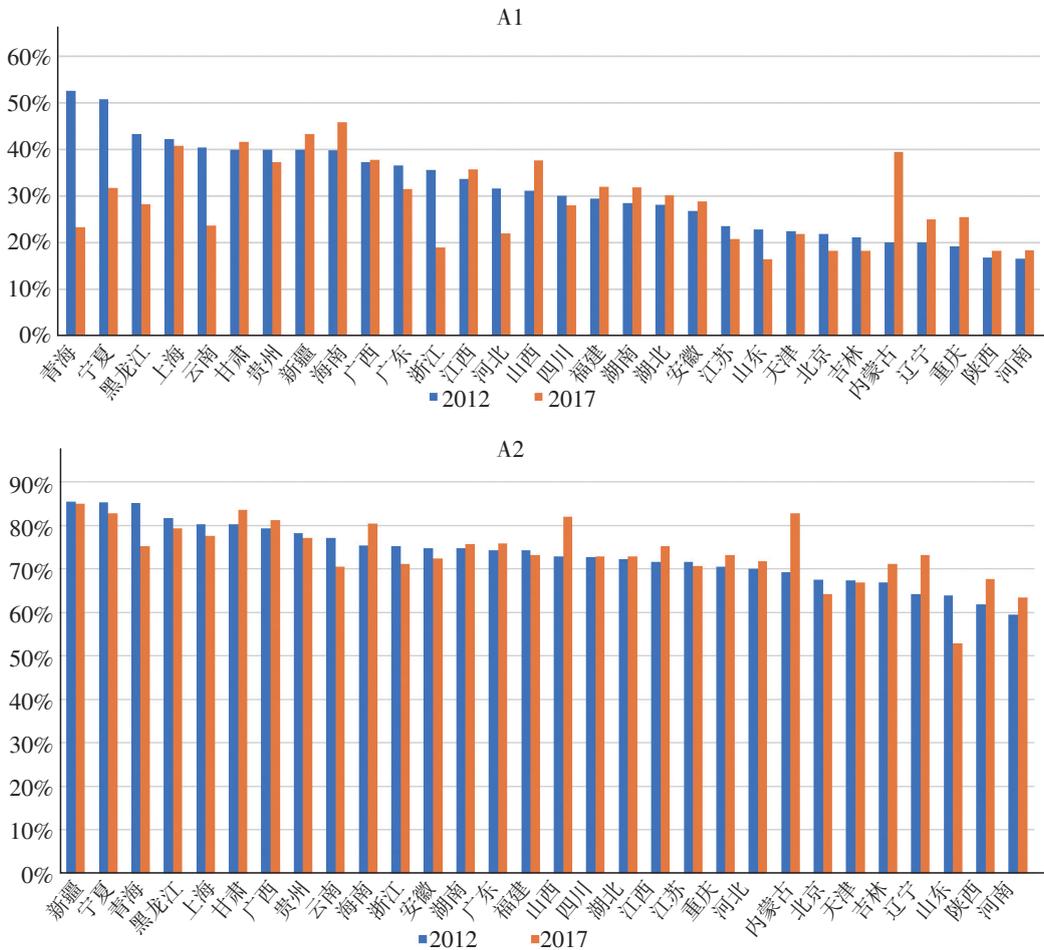


图4 2012年和2017年省份直接和间接水资源占水足迹比例的总体情况

附表2进一步梳理了各省份最终使用环节引起的多区域部门间虚拟水转移的主要路径。由于数据结果繁多,附表2仅列出各省份水资源消耗量第一和第二大的虚拟水关键部门

路径。对于省份的直接水资源消耗来说,2012年中国63%的省份其虚拟水资源的主要消耗路径集聚在省份内部,这些省份主要是中西部的省份;相较而言,东部经济发达省份其虚拟水资源的主要消耗路径较为多元化,区域间部门关联作用较为明显。相较于2012年,2017年东部沿海省份增强了省份内虚拟水资源部门消耗。而对于省份的两次间接水资源消耗来说,各省份2012年和2017年均呈现多元化的虚拟水部门传导路径,该现象说明省份未来水资源危机的应对和管理具有潜在的挑战。

对于2012年和2017年的共同趋势来说,各省份的直接水资源消耗、第一次间接水资源消耗以及第二次间接水资源消耗主要发生在农业部门,该部门区域间的虚拟水转移量较大并且占比较高;除农业部门外,各省份的食品和烟草部门、电力热力燃气和水供应部门以及建筑部门也是支撑各省份直接水资源消耗的关键部门;除农业部门外,各省份的电力热力燃气和水供应部门、化学产品部门以及金属冶炼和压延加工品部门也是影响各省份第一次和第二次间接水资源消耗的关键部门。

四、结论和建议

(一)研究结论

本文基于中国2012年和2017年区域间投入产出表重点分析了各省份的水足迹以及省域间虚拟水转移情况,并进一步基于结构路径分析方法识别了各省份水资源消耗的关键部门及其转移路径的时空变化趋势,为省域经济发展中水资源危机应对及水资源管理提供支撑。本文结论如下:

第一,2012年和2017年水足迹较高的省份主要包括经济体量和人口密度较高的东部沿海省份江苏和广东,中国重要的商品粮基地湖北和湖南以及中国重要的农产品生产基地新疆。2012年和2017年各省份最终使用水足迹占比较高的组分是居民消费和省际调出。相较于2012年,2017年东部经济发达省份通过省际调入虚拟水资源商品满足其当地最终水资源需求的趋势明显;中西部地区的居民消费、政府消费以及固定资产最终需求产生的水足迹增长趋势明显。

第二,从省际虚拟水贸易来看,中国净进口虚拟水地区主要集聚在东部沿海省份,但相较于2012年,2017年中西部地区的净进口虚拟水幅度较大。中国净出口虚拟水省份以及2017年其增长幅度较大的省份是内蒙古和黑龙江。

第三,通过各省份水资源消耗的关键部门路径分析可以看出,2012年和2017年各省份直接水资源消耗路径依赖其省份内传导趋势增强,间接水资源消耗路径较为多元化并且省际间关联作用较强。对于主要的关键部门来说,各省份的直接水资源消耗、第一次间接水资源消耗以及第二次间接水资源消耗主要发生在农业部门。

(二)政策建议

第一,从各省份最终需求结构产生的水足迹来看,居民消费拉动的水资源消耗较高。目

前,由于2020年新冠疫情影响,中国的经济发展还处于复苏阶段,党中央也把充分发挥中国超大规模市场优势和内需潜力作为经济复苏的重大战略。由此,如何降低需求端引起的水资源消耗十分关键,也是中国各省份经济绿色复苏的重要环节。政府以及社区应借助新闻媒体等多元化的平台继续宣传节水的重要性进而提升居民的节水行为和意识。政府可激励企业厉行绿色化发展的行为,例如优化商品的生态标签,在外包装中标明商品生产的耗水情况,进而潜移默化消费者绿色化的购买行为。

第二,对于虚拟水转移在省际贸易中增强趋势而言,各省份应重点考量如何实现高效的虚拟水贸易大循环。从节水的角度来讲,省份可强化通过省际贸易进口水资源消耗较低的商品,进而倒逼各省份部门的用水效率的提升。省份也可考虑增强对外贸易中虚拟水资源的转移,例如可以充分发挥省份在“一带一路”以及“区域全面经济伙伴关系协定”等对外政策中的纽带作用,进口用水效率高水资源产品,进而推动“双循环”战略在水资源可持续管理中的作用。

第三,对于当前省际虚拟水贸易的不平等转移格局而言,相关部门可考虑搭建省域虚拟水贸易的动态监测平台及决策支持系统,明晰不同虚拟水商品的省域间转移动态及格局,制定省域间贸易的生态补偿机制。

第四,对于虚拟水转移的关键部门管理而言,各省份应继续重视农业部门水资源的高效利用,加大农业部门节水技术的投入,提升资源效率。鉴于省际部门间的间接水资源传导路径作用在增强以及新冠疫情对于产业链的负面影响仍存在不确定性,后疫情时代各省份应更加注意产业链的应急防控,尤其是对于各省份主要的水资源传导的产业链,应尝试基于大数据等智能化手段建立产业链视角的水资源利用的数字化平台以利于水资源危机的防控和应对。最后,鉴于高能耗及排放的制造业部门例如金属冶炼以及化学品等部门也是省份的水资源关键消耗部门。目前,中国正处在“双碳目标”的攻坚阶段,如何实现在减碳工作中的水资源节约协同管理是十分重要的环节,各省份可考虑在多目标优化管理框架下开展减碳工作,实现资源环境的协同效益。

附录:

附表 1	部门及省份信息			
	部门	代码	省份	代码
	农业	s1	北京	01
	煤炭采选产品	s2	天津	02
	石油和天然气开采产品	s3	河北	03
	金属矿采选产品	s4	山西	04
	非金属矿和其他矿采选产品	s5	内蒙古	05
	食品和烟草	s6	辽宁	06
	纺织品	s7	吉林	07
	纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品	s8	黑龙江	08

续附表 1

部门及省份信息

部门	代码	省份	代码
木材加工品和家具	s9	上海	09
造纸印刷和文教体育用品	s10	江苏	10
石油、炼焦产品和核燃料加工品	s11	浙江	11
化学产品	s12	安徽	12
非金属矿物制品	s13	福建	13
金属冶炼和压延加工品	s14	江西	14
金属制品	s15	山东	15
通用设备	s16	河南	16
专用设备	s17	湖北	17
交通运输设备	s18	湖南	18
电气机械和器材	s19	广东	19
通信设备、计算机和其他电子设备	s20	广西	20
仪器仪表及回收工业	s21	海南	21
电力热力燃气和水供应	s22	重庆	22
建筑	s23	四川	23
批发和零售	s24	贵州	24
交通运输、仓储和邮政	s25	云南	25
住宿和餐饮	s26	陕西	26
信息传输、软件和信息技术服务	s27	甘肃	27
金融	s28	青海	28
房地产	s29	宁夏	29
租赁和商务服务	s30	新疆	30
科学研究和技术服务	s31		
水利、环境和公共设施管理	s32		
居民服务、修理和其他服务	s33		
教育	s34		
卫生和社会工作	s35		
文化、体育和娱乐	s36		
公共管理、社会保障和社会组织	s37		

附表 2

2012年和2017年各省份虚拟水资源关键部门消耗路径

最终需求 省份	水资源来源 省份及部门	2012年			2017年		
		直接消耗	第一次间接 消耗	第二次间接 消耗	直接消耗	第一次间接 消耗	第二次间接 消耗
北京	路径1	新疆 s1	新疆 s1	新疆 s1	河北 s1	黑龙江 s1	黑龙江 s1
	路径2	北京 s1	黑龙江 s1	黑龙江 s1	新疆 s1	新疆 s1	新疆 s1
天津	路径1	新疆 s1	新疆 s1	新疆 s1	内蒙古 s1	内蒙古 s1	内蒙古 s1
	路径2	天津 s1	天津 s1	黑龙江 s1	天津 s1	辽宁 s1	辽宁 s1
河北	路径1	河北 s1	河北 s1	河北 s1	河北 s1	河北 s1	河北 s1
	路径2	新疆 s1	新疆 s1	新疆 s1	内蒙古 s1	内蒙古 s1	内蒙古 s1
山西	路径1	山西 s1	山西 s1	山西 s1	山西 s1	山西 s1	山西 s1
	路径2	新疆 s1	黑龙江 s1	黑龙江 s1	内蒙古 s1	内蒙古 s1	内蒙古 s1
内蒙古	路径1	内蒙古 s1	内蒙古 s1	内蒙古 s1	内蒙古 s1	内蒙古 s1	内蒙古 s1
	路径2	新疆 s1	新疆 s1	新疆 s1	新疆 s1	新疆 s1	新疆 s1
辽宁	路径1	辽宁 s1	辽宁 s1	辽宁 s1	辽宁 s1	辽宁 s1	辽宁 s1

续附表2 2012年和2017年各省份虚拟水资源关键部门消耗路径

最终需求省份	水资源来源省份及部门	2012年			2017年		
		直接消耗	第一次间接消耗	第二次间接消耗	直接消耗	第一次间接消耗	第二次间接消耗
吉林	路径2	新疆 s1	新疆 s1	新疆 s1	新疆 s1	新疆 s1	新疆 s1
	路径1	吉林 s1	吉林 s1	吉林 s1	黑龙江 s1	黑龙江 s1	黑龙江 s1
黑龙江	路径2	吉林 s22	吉林 s22	吉林 s22	吉林 s1	吉林 s1	吉林 s1
	路径1	黑龙江 s1	黑龙江 s1	黑龙江 s1	黑龙江 s1	黑龙江 s1	黑龙江 s1
上海	路径2	黑龙江 s22	黑龙江 s22	黑龙江 s22	辽宁 s1	辽宁 s1	辽宁 s1
	路径1	新疆 s1	上海 s22	上海 s22	上海 s1	上海 s22	上海 s22
江苏	路径2	上海 s1	新疆 s1	新疆 s1	上海 s22	新疆 s1	黑龙江 s1
	路径1	江苏 s1	江苏 s1	江苏 s1	江苏 s1	江苏 s1	江苏 s1
浙江	路径2	江苏 s22	江苏 s22	江苏 s22	江苏 s22	江苏 s22	江苏 s22
	路径1	浙江 s1	浙江 s1	浙江 s1	浙江 s1	浙江 s1	新疆 s1
安徽	路径2	新疆 s1	新疆 s1	新疆 s1	新疆 s1	新疆 s1	新疆 s1
	路径1	安徽 s1	安徽 s1	安徽 s1	安徽 s1	安徽 s1	安徽 s1
福建	路径2	安徽 s22	安徽 s22	安徽 s22	安徽 s22	安徽 s22	安徽 s22
	路径1	福建 s1	福建 s1	福建 s1	福建 s1	福建 s1	福建 s1
江西	路径2	福建 s22	福建 s22	福建 s22	新疆 s1	新疆 s1	福建 s22
	路径1	江西 s1	江西 s1	江西 s1	江西 s1	江西 s1	江西 s1
山东	路径2	江西 s22	江西 s22	江西 s22	新疆 s1	江西 s22	江西 s22
	路径1	山东 s1	山东 s1	山东 s1	山东 s1	山东 s1	山东 s1
河南	路径2	新疆 s1	新疆 s1	新疆 s1	河北 s1	新疆 s1	新疆 s1
	路径1	河南 s1	河南 s1	河南 s1	河南 s1	河南 s1	河南 s1
湖北	路径2	新疆 s1	新疆 s1	新疆 s1	陕西 s1	陕西 s1	陕西 s1
	路径1	湖北 s1	湖北 s1	湖北 s1	湖北 s1	湖北 s1	湖北 s1
湖南	路径2	湖北 s22	湖北 s22	湖北 s22	湖北 s22	湖北 s22	湖北 s22
	路径1	湖南 s1	湖南 s1	湖南 s1	湖南 s1	湖南 s1	湖南 s1
广东	路径2	湖南 s22	湖南 s22	湖南 s22	湖南 s22	湖南 s22	湖南 s22
	路径1	广东 s1	广东 s1	广东 s1	广东 s1	广东 s1	广东 s1
广西	路径2	新疆 s1	新疆 s1	新疆 s1	广西 s1	广西 s1	广西 s1
	路径1	广西 s1	广西 s1	广西 s1	广西 s1	广西 s1	广西 s1
海南	路径2	广西 s6	广西 s22	广西 s22	广西 s6	广西 s22	广西 s22
	路径1	海南 s1	海南 s1	海南 s1	海南 s1	新疆 s1	新疆 s1
重庆	路径2	新疆 s1	新疆 s1	新疆 s1	新疆 s1	海南 s1	黑龙江 s1
	路径1	重庆 s1	重庆 s22	重庆 s22	重庆 s1	新疆 s1	重庆 s22
四川	路径2	重庆 s22	重庆 s1	重庆 s1	新疆 s1	重庆 s1	新疆 s1
	路径1	四川 s1	四川 s1	四川 s1	四川 s1	四川 s1	四川 s1
贵州	路径2	四川 s6	四川 s12	四川 s12	新疆 s1	四川 s12	新疆 s1
	路径1	贵州 s1	贵州 s1	贵州 s22	贵州 s1	贵州 s1	贵州 s22
云南	路径2	贵州 s22	贵州 s22	贵州 s1	云南 s1	云南 s1	贵州 s1
	路径1	云南 s1	云南 s1	云南 s1	云南 s1	云南 s1	云南 s1
陕西	路径2	云南 s22	云南 s22	云南 s22	云南 s22	云南 s22	云南 s22
	路径1	陕西 s1	陕西 s1	陕西 s1	陕西 s1	陕西 s1	甘肃 s1
甘肃	路径2	新疆 s1	江苏 s1	新疆 s1	甘肃 s1	甘肃 s1	陕西 s1
	路径1	甘肃 s1	甘肃 s1	甘肃 s1	甘肃 s1	甘肃 s1	甘肃 s1
青海	路径2	甘肃 s6	甘肃 s14	甘肃 s22	新疆 s1	新疆 s1	新疆 s1
	路径1	青海 s1	青海 s1	青海 s1	青海 s1	青海 s1	青海 s1
	路径2	青海 s12	青海 s14	青海 s14	新疆 s1	新疆 s1	黑龙江 s1

续附表2 2012年和2017年各省份虚拟水资源关键部门消耗路径

最终需求省份	水资源来源省份及部门	2012年			2017年		
		直接消耗	第一次间接消耗	第二次间接消耗	直接消耗	第一次间接消耗	第二次间接消耗
宁夏	路径1	宁夏 s1	宁夏 s1	宁夏 s1	宁夏 s1	宁夏 s1	宁夏 s1
	路径2	宁夏 s23	宁夏 s10	黑龙江 s1	新疆 s1	新疆 s1	新疆 s1
新疆	路径1	新疆 s1	新疆 s1	新疆 s1	新疆 s1	新疆 s1	新疆 s1
	路径2	新疆 s22	新疆 s22	新疆 s22	云南 s1	黑龙江 s1	黑龙江 s1

注:以2012年北京的路径1为例说明附表2的解读方式。对于北京最终需求产生的水资源消耗来说,其直接水资源消耗主要来源是新疆的农业部门,其第一次和第二次间接水资源消耗主要来源也是新疆的农业部门。表中的部门代码信息请见附表1。

参考文献:

- [1] 邓楚雄,张光杰,李科. 跨省贸易中水污染物与增加值的虚拟转移及其环境不平等测度 [J]. 环境经济研究,2020,5(02):18-33.
- [2] 邓光耀. 中国各行业供给侧和需求侧水足迹研究 [J]. 统计与决策,2021,37(4):73-77.
- [3] 李方一,刘卫东,刘红光. 区域间虚拟水贸易模型及其在山西省的应用 [J]. 资源科学,2012,34(5):802-810.
- [4] 柳雅文,赵旭,刘俊国. 天津市最终产品本地用水量测度及其驱动机理研究 [J]. 资源科学,2016,38(10):1913-1924.
- [5] 孙才志,郑靖伟. 基于投入产出表的中国水资源消耗结构路径分析 [J]. 地理科学进展,2021,40(3):370-381.
- [6] 田贵良,李娇娇,李乐乐. 基于多区域投入产出模型的长江经济带虚拟水流动格局研究 [J]. 中国人口·资源与环境,2019,29(3):81-88.
- [7] 王圣云,林玉娟. 中国区域农业生态效率空间演化及其驱动因素——水足迹与灰水足迹视角 [J]. 地理科学,2021,41(2):290-301.
- [8] 王勇. 全行业口径下中国区域间贸易隐含虚拟水的转移测算 [J]. 中国人口·资源与环境,2016,26(4):107-115.
- [9] Aldaya, M. M., J. A. Allan, and A. Y. Hoekstra. Strategic Importance of Green Water in International Crop Trade[J]. Ecological Economics, 2010, 69: 887-894.
- [10] Allan, J. A. Virtual Water: A Strategic Resource, Global Solutions to Regional Deficits[J]. Groundwater, 1998, 36: 545-551.
- [11] Chapagain, A. K. and A. Y. Hoekstra. The Water Footprints of Nations[J]. Journal of Banking & Finance, 2006, 27(8):1427-1453.
- [12] Chen, W., S. M. Wu, Y. L. Lei, and S. T. Li. China's Water Footprint by Province, and Inter-Provincial Transfer of Virtual Water[J]. Ecological Indicators, 2017, 74: 321-333.
- [13] Chen, W., S. M. Wu, Y. L. Lei, and S. T. Li. Virtual Water Export and Import in China's Foreign Trade: A Quantification Using Input-Output Tables of China From 2000 to 2012[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2018, 132: 278-290.
- [14] Dong, H. J., Y. Geng, T. Fujita, M. Fujii, H. Dong, and X. M. Yu. Uncovering Regional Disparity of China's Water Footprint and Inter-Provincial Virtual Water Flows[J]. Science of the Total Environment, 2014, 500-501: 120-130.

- [15] Feng, K., K. Hubacek, S. Pfister, Y. Yu, and L. X. Sun. Virtual Scarce Water in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48: 7704–7713.
- [16] Hoekstra, A. Y. and P. Q. Hung. Virtual Water Trade: A Quantification of Virtual Water Flows Between Nations in Relation to International Crop Trade[R]. 2002.
- [17] Jin, L. and W. Young. Water Use in Agriculture in China: Importance, Challenges, and Implications for Policy[J]. *Water Policy*, 2001, 3(3): 215–228.
- [18] Lenzen, M. Structural Path Analysis of Ecosystem Networks[J]. *Ecological Modelling*, 2007, 200(3–4): 334–342.
- [19] Li, H., S. Liang, Y. H. Liang, K. Li, J. C. Qi, X. C. Yang, C. Y. Feng, Y. P. Cai, and Z. F. Yang. Multi-Pollutant Based Grey Water Footprint of Chinese Regions[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2021, 164: 105202.
- [20] Li, M., T. Wiedmann, J. G. Liu, Y. F. Wang, Y. C. Hu, Z. Y. Zhang, and M. Hadjikakou. Exploring Consumption-Based Planetary Boundary Indicators: An Absolute Water Footprinting Assessment of Chinese Provinces and Cities[J]. *Water Research*, 2020, 184: 116163.
- [21] Liao, X. W., X. Zhao, W. F. Liu, R. S. Li, X. X. Wang, W. P. Wang, and M. R. Tillotson. Comparing Water Footprint and Water Scarcity Footprint of Energy Demand in China's Six Megacities [J]. *Applied Energy*, 2020, 269: 115137.
- [22] Liao, X. W., X. Zhao, Y. Jiang, Y. Liu, Y. J. Yi, and M. R. Tillotson. Water Footprint of the Energy Sector in China's Two Megalopolises[J]. *Ecological Modelling*, 2019, 391: 9–15.
- [23] Liao, X., L. Chai, and Y. Liang. Income Impacts on Household Consumption's Grey Water Footprint in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 755: 142584.
- [24] Liu, X., H. B. Du, Z. K. Zhang, J. C. Crittenden, M. L. Lahr, J. M. Cruz, D. B. Guan, Z. F. Mi, and J. Zuo. Can Virtual Water Trade Save Water Resources?[J]. *Water Research*, 2019, 163: 114848.
- [25] Qian, Y., H. J. Dong, Y. Geng, S. Z. Zhong, X. Tian, Y. H. Yu, Y. H. Chen, and D. A. Moss. Water Footprint Characteristic of Less Developed Water-Rich Regions: Case of Yunnan, China [J]. *Water Research*, 2018, 141: 208–216.
- [26] Sun, S. and C. Fang. Factors Governing Variations of Provincial Consumption-Based Water Footprints in China: An Analysis Based on Comparison with National Average[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 654: 914–923.
- [27] Sun, S., C. Fang, and J. Lv. Spatial Inequality of Water Footprint in China: A Detailed Decomposition of Inequality From Water Use Types and Drivers[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 553: 398–407.
- [28] Tian, X., J. Sarkis, Y. Geng, Y. Y. Qian, C. X. Gao, R. Bleischwitz, and Y. Xu. Evolution of China's Water Footprint and Virtual Water Trade: A Global Trade Assessment[J]. *Environment International*, 2018, 121: 178–188.
- [29] Wada, Y., L. P. H. V. Beek, and M. F. P. Bierkens. Modelling Global Water Stress of the Recent Past: On the Relative Importance of Trends in Water Demand and Climate Variability [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15: 3785–3808.
- [30] White, D. J., K. S. Feng, L. X. Sun, and K. Hubacek. A Hydro-Economic MRIO Analysis of the Haihe River Basin's Water Footprint and Water Stress[J]. *Ecological Modelling*, 2015, 318: 157–167.
- [31] Wood, R. and M. Lenzen. Structural Path Decomposition[J]. *Energy Economics*, 2009, 31(3): 335–341.
- [32] Xiong, Y., X. Tian, S. W. Liu, and Z. P. Tang. New Patterns in China's Water Footprint: Analysis of Spatial and Structural Transitions from A Regional Perspective[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 245: 118942.
- [33] Xu, X., Y. Zhang, and Y. Chen. Projecting China's Future Water Footprint Under the Shared Socio-Economic Pathways[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 260: 110102.

- [34] Zhang, C. and L. D. Anadon. A Multi-Regional Input-Output Analysis of Domestic Virtual Water Trade and Provincial Water Footprint in China[J]. *Ecological Economics*, 2014, 100: 159-172.
- [35] Zhao, D. D., K. Hubacek, K. S. Feng, L. X. Sun, and J. G. Liu. Explaining Virtual Water Trade: A Spatial-Temporal Analysis of The Comparative Advantage of Land, Labor and Water in China [J]. *Water Research*, 2019a, 153: 304-314.
- [36] Zhao, D. D., Y. Tang, J. G. Liu, and M. R. Tillotson. Water Footprint of Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 167: 919-928.
- [37] Zhao, G. M., C. Gao, R. Xie, M. Y. Lai, and L. G. Yang. Provincial Water Footprint in China and Its Critical Path[J]. *Ecological Indicators*, 2019b, 105: 634-644.
- [38] Zhao, X., J. Liu, Q. Y. Liu, M. R. Tillotson, D. B. Guan, and K. Hubacek. Physical and Virtual Water Transfers for Regional Water Stress Alleviation in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(4): 1031-1035.
- [39] Zhao, X., Y. P. Li, H. Yang, W. F. Liu, M. R. Tillotson, D. B. Guan, Y. Yi, and H. Wang. Measuring Scarce Water Saving from Interregional Virtual Water Flows in China[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13: 054012.
- [40] Zheng, H. R., Z. K. Zhang, W. D. Wei, M. L. Song, E. Dietzenbacher, X. Y. Wang, J. Meng, Y. L. Shan, J. M. Ou, and D. B. Guan. Regional Determinants of China's Consumption-based Emissions in the Economic Transition [J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15: 074001.

Spatial-Temporal Evolutionary Path of Regional Water Footprint and Virtual Water Trade in China

Tian Xu^{a,b}, Geng Yong^{a,b}, Wu Rui^c, Xu Yue^d

(a: School of International and Public Affairs, Shanghai Jiao Tong University; b: SJTU-UNIDO Joint Institute of Inclusive and Sustainable Industrial Development, Shanghai Jiao Tong University; c: Business School of Nanjing Normal University; d: School of Management and Economics, Beijing Institute of Technology)

Abstract: Water resources drives for regional economic development. Identifying the relevant water consumption at regional level has great significance for water management and addressing water crisis. Based on the Multi-Regional Input-output model in 2012 and 2017 and structural path analysis, this study revealed the characteristic and evolutionary trend of water consumption, virtual water trade and water critical pathways caused by final demand in each province. The results showed that: compared with the situation in 2012, the water footprint caused by household consumption, government consumption and fixed assets increased in central and western regions, furthermore, the net imported virtual water trade in central and western regions also increased in 2017; agricultural sector is the key water consumption sector in each province; provincial direct water consumption more relied on its local industries, and the path of provincial indirect water consumption became more diverse in 2017. In order to achieve the sustainable management of water resources, province should strengthen the governance of green consumption models, and promote the efficient in virtual water trade, and promote the ability of key industries addressing the water supply chain crisis.

Keywords: Multi-Regional Input-Output; Structural Path Analysis; Virtual Water Trade; Water Footprint

JEL Classification: Q25, Q56

(责任编辑:卢玲)