

北京市虚拟水消费与贸易

魏怡然¹, 邵玲¹, 张宝刚², 徐佩琦¹, 秦菁敏¹

(1. 中国地质大学(北京)经济管理学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要:北京市作为水资源极度紧缺的城市,亟需提高水资源的利用效率。本文基于多尺度投入产出分析模型,对2012年北京市虚拟水消费及贸易情况进行了核算与分析,并与2007年的结果进行了比较。计算结果表明:2012年北京市消费引发的虚拟水用量高达139.5亿 m^3 ,是基于生产的直接实体用水量(35.9亿 m^3)的3.89倍;对比2007年,虚拟水消费增长(23.7%)远比直接用水增长(11.8%)快。北京市使用的全部水资源中仅有5%由北京本地供应,有超过3/5从国内其他省市调入,约35%从世界其他国家进口。与此相对应,这些水资源有1/5被北京本地消费使用,约3/4被调出到国内其他省市,6%被出口至其他国家。与2007年相比,2012年北京市国内虚拟水贸易由净调入转为净调出,净调出量为2007年净调入量的1.1倍;而国际虚拟水贸易由净出口转为净进口,净进口量为2007年净出口量的837.2倍。北京市2012年净输入虚拟水资源103.6亿 m^3 (全部来源于国际贸易),有效地避免了对本地水资源的过度开采。与此同时,北京市通过转口贸易的形式将大量进口的虚拟水调到了中国其他省市,为缓解国内水资源紧张局面作出了贡献。未来北京市应当在考虑能源矿产供应安全及消化国内过剩产能的前提下有策略性地增加矿产、能源、建筑和交通运输设备等部门部分产品的进口,以达到节约我国水资源及全球范围内水资源高效利用的目的。

关键词: 虚拟水;多尺度投入产出;虚拟水消费;虚拟水贸易;北京

水资源在现代经济发展中扮演着重要角色。北京市作为我国最重要的经济发展中心之一,人均水资源占有量为161 m^3 ,仅为国际极度缺水警戒线标准的1/3。近年来北京市入境水量锐减,降水量连续处于枯水年,地下水被严重超采,可利用水资源总量大幅下降,造成严重的资源性缺水问题^[1]。水资源短缺已成为制约北京市可持续发展的重要瓶颈之一。

任何产品在其生产过程中均会消耗水资源,水资源会通过产品的贸易行为形成虚拟的、间接的转移。Allan^[2]在1993年正式提出虚拟水概念,定义为产品生产过程中消耗的水资源量。北京市除了消费本市生产的产品,还从国内其他省区调入并从本地调出了产品,从国外进口并从本地出口了产品。因此对北京市社会经济中的水资源使用,尤其是对对外贸易(包括调入调出贸易和进出口贸易)隐含的虚拟水资源的转移进行系统模拟,对了解北京市水供应链现状及提出科学高效的节水政策有重要意义。

目前关于虚拟水的研究主要集中于消费结构对地区虚拟水消费的影响以及如何通过

收稿日期: 2019-03-10; 修订日期: 2019-06-30

基金项目: 北京市社会科学基金项目(16LJC013); 国家自然科学基金项目(71503236)

作者简介: 魏怡然(1997-),女,山东淄博人,硕士,研究方向为环境经济学。

E-mail: wyr0813@163.com

通讯作者: 邵玲(1986-),女,新疆巴州人,副教授,硕士生导师,研究方向为资源经济学。

E-mail: shaoling@cugb.edu.cn

贸易方式实现地区水资源的合理配置^[3-5],方法主要分为自下而上的过程分析法和自上而下的投入产出法^[6-8]。自下而上的过程分析法主要通过追溯该产品整个生产供应链中的用水量之和来表征维持人类产品和服务消费所需要的真实水资源数量,其适用较小的空间尺度,通常需要详细的数据作支持,且计算较为复杂^[9]。从上至下的投入产出法最早由Leontief^[10]提出,通过将虚拟水流与经济流相关联,其能够计算得到隐含在社会经济最终消费中的所有直接与间接的水资源使用总和。投入产出方法能够避免过程分析方法的截断误差,被广泛地用于不同尺度宏观经济体的虚拟水核算研究中^[11-14],但其也存在时间精度相对较低等问题^[9]。

目前有两种投入产出方法被用于虚拟水的研究,即单区域投入产出方法(single-region input-output analysis, SRIO)及多区域投入产出方法(multi-regional input-output analysis, MRIO)。SRIO忽略了调入产品中的虚拟水^[15]或者假设调入产品虚拟水强度与本地产品强度相同^[16],因此无法准确计算贸易隐含的虚拟水转移量。MRIO对不同经济体生产的同类产品和服务的不同虚拟水含量做出了区分,但开展MRIO研究需要大量的基础数据,目前省市层面的研究仍然存在数据不足、不准确等问题^[17-20]。结合以上两种方法的多尺度投入产出方法(multi-scale input-output analysis, MSIO)最早由Chen等^[21]提出,旨在基于世界经济和国家经济产品虚拟水强度数据库对区域经济进口和调入产品的虚拟水含量进行核算。该方法既可以区分不同经济系统中相同产品的虚拟水强度(优于SRIO方法),同时需要的数据远比MRIO方法少且易得。Shao等^[18]提出了水资源的MSIO模型,目前已有相关应用^[22-23]。Shao等^[18]对2007年北京市虚拟水消费及贸易的研究发现,北京市本地最终消费的虚拟水资源中仅有15%来源于本地,85%来源于国内和世界进口的产品。

2012年北京市经济形势相比2007年发生显著变化。2012年北京市地区生产总值较2007年增长(以下如无特殊说明,均为实际增长量)20.86%。在经济快速增长的同时北京市最终消费也发生了明显改变,城镇居民消费和存货增加较2007年分别增长42.82%和下降48.71%。除此之外,北京市2012年进口贸易量较2007年增长3.36倍,调入与调出贸易量较2007年分别增长2.75倍和5.64倍,变化巨大。基于以上改变,本文拟采用MSIO方法核算分析2012年北京市虚拟水消费与贸易情况,并将结果与2007年进行比较,最终提出既符合北京实际又不影响北京居民日益增长的消费需求的虚拟水政策建议。

1 研究方法与数据来源

1.1 多尺度投入产出分析模型

根据虚拟水多尺度投入产出分析模型^[18],本研究将北京市视为本地尺度,将中国除北京市的其他省市划分为中国尺度,世界除中国的其他国家划分为世界尺度。表1显示了北京市虚拟水多尺度投入产出表的一般形式。表中涉及的各类产品被分入 n 个部门,包括北京市本地产品、国内其他省市调入产品和世界其他国家进口产品。 $Z_{i,j}^L$ 、 $Z_{i,j}^D$ 以及 $Z_{i,j}^F$ 分别代表生产本地产品的过程中本地尺度、中国尺度以及世界尺度的部门 i 对本地部门 j 投入的经济流, y_i^L 、 y_i^D 和 y_i^F 代表三个尺度的部门 i 为满足北京本地最终消费生产的本地产品,调入的国内产品和进口的世界产品的经济流。与调入和进口相对应,本地生产的本地产品也会向国内其他地区调出及向世界其他国家出口, $e_{i,D}^L$ 、 $e_{i,F}^L$ 表示的是部门 i 生产的本地产品向国内其他地区、国外输出的经济流。 X_i 表示本地部门 i 的总产出, F_i 表

表1 北京市虚拟水的多尺度投入产出表
Table 1 The multi-scale input-output table for virtual water accounting of Beijing

投入		产出						总产出
		本地中间使用			最终使用			
		部门1	⋯	部门 n	本地最终消费	国内调出	世界出口	
本地中间投入	部门1	$Z_{1,1}^L$	⋯	$Z_{1,n}^L$	y_1^L	$e_{1,D}^L$	$e_{1,F}^L$	X_1
	⋮	⋮	⋯	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	部门 n	$Z_{n,1}^L$	⋯	$Z_{n,n}^L$	y_n^L	$e_{n,D}^L$	$e_{n,F}^L$	X_n
国内中间投入	部门1	$Z_{1,1}^D$	⋯	$Z_{1,n}^D$	y_1^D	$e_{1,D}^D$	$e_{1,F}^D$	
	⋮	⋮	⋯	⋮	⋮	⋮	⋮	
	部门 n	$Z_{n,1}^D$	⋯	$Z_{n,n}^D$	y_n^D	$e_{n,D}^D$	$e_{n,F}^D$	
世界中间投入	部门1	$Z_{1,1}^F$	⋯	$Z_{1,n}^F$	y_1^F	$e_{1,D}^F$	$e_{1,F}^F$	
	⋮	⋮	⋯	⋮	⋮	⋮	⋮	
	部门 n	$Z_{n,1}^F$	⋯	$Z_{n,n}^F$	y_n^F	$e_{n,D}^F$	$e_{n,F}^F$	
直接用水		F_1	⋯	F_n				

示部门*i*直接消耗的水资源量。
根据投入产出模型，部门*i*的总产出遵循以下平衡：

$$X_i = \sum_{j=1}^n Z_{ij}^L + y_i^L + e_{i,D}^L + e_{i,F}^L \tag{1}$$

即一个部门的总产出等于该部门产品的中间消耗量加上最终消耗量。多尺度投入产出模型引入ε表征每单位产品的虚拟水含量，即产品的水足迹或虚拟水强度，则ε_{j^L}、ε_{j^D}和ε_{j^F}分别表示本地生产、国内调入和世界进口的*j*部门产品的虚拟水强度。针对北京市本地部门*i*，可以得到以下虚拟水平衡方程式：

$$F_i + \sum_{j=1}^n \varepsilon_j^L Z_{j,i}^L + \sum_{j=1}^n \varepsilon_j^D Z_{j,i}^D + \sum_{j=1}^n \varepsilon_j^F Z_{j,i}^F = \varepsilon_i^L X_i \tag{2}$$

对于包含*n*个部门的北京市经济系统，式（2）可以写成矩阵的形式：
$$\mathbf{F} + \boldsymbol{\varepsilon}^L \mathbf{Z}^L + \boldsymbol{\varepsilon}^D \mathbf{Z}^D + \boldsymbol{\varepsilon}^F \mathbf{Z}^F = \boldsymbol{\varepsilon}^L \mathbf{X} \tag{3}$$

式中： $\mathbf{F}=[F_i]_{1 \times n}$ ； $\boldsymbol{\varepsilon}^L=[\varepsilon_i^L]_{1 \times n}$ ， $\boldsymbol{\varepsilon}^D=[\varepsilon_i^D]_{1 \times n}$ ， $\boldsymbol{\varepsilon}^F=[\varepsilon_i^F]_{1 \times n}$ ； $\mathbf{Z}^L=[z_{ij}^L]_{n \times n}$ ， $\mathbf{Z}^D=[z_{ij}^D]_{n \times n}$ ， $\mathbf{Z}^F=[z_{ij}^F]_{n \times n}$ ； $\mathbf{X}=[x_{ij}]_{n \times n}$ ，当*i=j*时，*x_{ij}*=*x_i*，当*i≠j*时，*x_{ij}*=0。

解方程可得北京市本地产品虚拟水强度矩阵的计算公式如下所示：
$$\boldsymbol{\varepsilon}^L = (\mathbf{F} + \boldsymbol{\varepsilon}^D \mathbf{Z}^D + \boldsymbol{\varepsilon}^F \mathbf{Z}^F)(\mathbf{X} - \mathbf{Z}^L)^{-1} \tag{4}$$

将产品虚拟水强度乘以相应经济流量，可得隐含于该经济流的虚拟水资源量。

1.2 数据来源

根据式（4），开展多尺度投入产出模拟需要三类基础数据。第一类数据是北京市各部门直接用水量（**F**），本文使用北京市水务局发布的《2012年北京市水资源公报》得到了各部门的直接用水量。第二类是北京市相关经济投入产出数据（**Z^L**、**Z^D**、**Z^F**、**X**），本文使用了北京市统计局发布的《2012年北京市投入产出表》，该表将北京市分为42个产业部门，部门列表见表2。第三类数据是调入与进口产品的世界尺度与国家尺度虚拟水强度数据库（**ε^D**、**ε^F**），本文引用了Shao等^[18]和Han等^[24]论文中2012年中国和世界（除中国）26部门虚拟水强度数据库中的结果，并将其与北京的42个部门进行了匹配（表2）。

2 结果分析

2.1 北京市2012年虚拟水消费

2012年,北京市直接用水量达35.9亿 m^3 ,相对2007年(32.1亿 m^3 ;本文用于对比的

表2 2012年北京市42部门调入与进口产品虚拟水强度

Table 2 Virtual water intensity of 42 sectors for Beijing's domestic and international imports in 2012 ($\text{m}^3/\text{万元}$)

代码	部门	缩写	调入产品 (中国)强度	进口产品 (世界除中国)强度
1	农林牧渔产品和服务	FFA	450.76	1170.12
2	煤炭采选产品	MWC	53.86	52.71
3	石油和天然气开采产品	EPN	53.86	52.71
4	金属矿采选产品	MPM	53.86	52.71
5	非金属矿和其他矿采选产品	MPN	53.86	52.71
6	食品和烟草	MFT	228.12	332.19
7	纺织品	MOT	140.04	174.67
8	纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品	MTW	140.04	174.67
9	木材加工品和家具	PTM	109.47	109.27
10	造纸印刷和文教体育用品	PPM	109.47	109.27
11	石油、炼焦产品和核燃料加工品	PPC	80.16	72.39
12	化学产品	CIN	80.16	72.39
13	非金属矿物制品	MNM	80.16	72.39
14	金属冶炼和压延加工品	SRM	75.41	65.50
15	金属制品	MMP	75.41	65.50
16	通用设备	MGP	75.41	65.50
17	专用设备	MSP	71.13	60.87
18	交通运输设备	MTE	70.02	53.63
19	电气机械和器材	MEM	70.02	53.63
20	通信设备、计算机和其他电子设备	MCE	70.02	53.63
21	仪器仪表	MMI	104.08	70.99
22	其他制造产品	OMA	21.23	126.70
23	废品废料	SWA	182.18	260.80
24	金属制品、机械和设备修理服务	RFM	182.18	260.80
25	电力、热力的生产和供应	PSE	182.18	260.80
26	燃气生产和供应	PDG	101.23	53.94
27	水的生产和供应	PDW	38.34	35.85
28	建筑	CON	22.65	16.48
29	批发和零售	WRT	22.65	16.48
30	交通运输、仓储和邮政	TSP	28.20	19.79
31	住宿和餐饮	HCS	112.63	101.19
32	信息传输、软件和信息技术服务	ITS	27.25	13.60
33	金融	FIN	27.25	13.60
34	房地产	RET	27.25	13.60
35	租赁和商务服务	TCS	31.84	22.40
36	科学研究和技术服务	SRD	31.84	22.40
37	水利、环境和公共设施管理	WEM	31.84	22.40
38	居民服务、修理和其他服务	RSR	55.60	18.81
39	教育	EDU	47.21	21.04
40	卫生和社会工作	HSW	47.21	21.04
41	文化、体育和娱乐	CAS	47.21	21.04
42	公共管理、社会保障和社会组织	PAS	31.84	22.40

北京市2007年数据均来源于Shao等^[18]增长11.8%。在此期间,北京市单位产值直接用水量下降了近5%,说明北京市针对直接用水的节水政策有一定成效。北京在全国率先启动节水型城市建设,自2005年起实施《北京市节约用水办法》,并在2012年根据实施经验和国内外节水措施对其进行修订,对直接用水的节约有显著促进。未来北京需进一步深挖潜力,努力提高实体水资源的利用效率^[25]。

42个部门中,部门27(PDW:水的生产和供应)因是向居民家庭、企业和其他用户供水的部门,直接用水最大(21.4亿 m^3 水),占总直接用水量的60%。部门1(FFA:农林牧渔产品和服务)是第二大直接用水部门(9.3亿 m^3),用水量占总直接用水量的26%。大田作物、设施农业、再生水利用对北京农业节水的潜力巨大^[26]。近期,北京针对性地发布了《中共北京市委北京市人民政府关于调结构转方式发展高效节水农业的意见》,将大力推进农业节水,促进北京现代农业发展^[27]。部门25(PSE:电力、热力的生产和供应)直接用水量占总量的6%,是第三大直接用水部门。北京市电力行业属于火力发电,通过发展高效冷却水技术,并努力提高电厂工业水系统的用水效率,该部门的直接用水量未来有望减少^[28]。除这三个部门外,其余部门直接用水量占比均未超过2%。

水资源使用归根结底是由最终消费或最终需求推动的。根据本研究三尺度投入产出模拟结果,2012年北京市虚拟水消费高达139.5亿 m^3 ,是基于生产的直接用水量的3.89倍。与2007年相比,北京市虚拟水用量增长了23.7%,远高于直接用水量的增长(11.8%)。在42个部门中,部门1(FFA:农林牧渔产品和服务)成为虚拟水消费量最大的部门,提供的最终产品在其产业链内共消费25.7亿 m^3 虚拟水(占比18.4%),是2007年该部门虚拟水消费量的1.69倍。这说明在此期间北京市对农林牧渔产品的需求十分旺盛,从而驱动了更多水资源的消耗。部门28(CON:建筑)和部门6(MFT:食品和烟草)分列第二名和第三名,其虚拟水消费分别占到了北京总虚拟水消费的17.57%和14.01%。其余39个部门虚拟水消费量占总量比例相对较小,均未超过5%。

北京市2012年本地最终消费包括城镇居民消费、农村居民消费、政府消费,固定资本形成及存货增加五种类型。由图1可以看出,城镇居民消费引发了超过50%的虚拟水消费、固定资本形成消费了25%的虚拟水,随后依次为政府消费(15%)、农村居民消费(4%)和存货增加(2%);除后两者顺序调换外次序与2007年基本一致。2012年北京城镇人口与农村人口比仅为6.25,但城镇居民虚拟水消费量约为农村居民虚拟水消费量的14.67倍。可以看出,北京城镇居民人均消费的虚拟水远超农村居民。相较于2007年,北京市城乡人口总数增长23.47%,而总虚拟水消费量增长了48%,人均虚拟水消费量增长约20%,这表明随着生活水平的提高,北京市居民引发了更多的水资源消耗。

2.2 北京市2012年虚拟水贸易

2012年,北京市向国内其他区域调入和调出了413.5亿 m^3 和505.9亿 m^3 虚拟

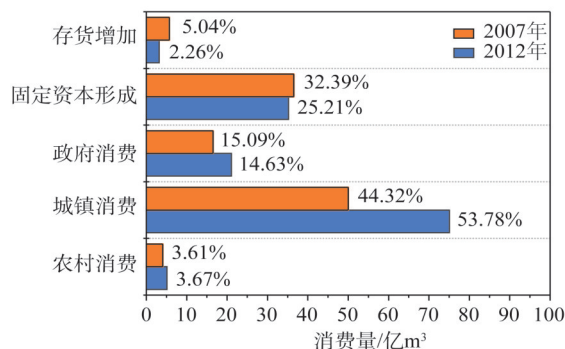


图1 北京市2007年与2012年本地最终消费的虚拟水消费量

Fig. 1 Virtual water consumption by final demands of Beijing in 2007 and 2012

水, 分别是2007年调入调出量的2.84倍和7.84倍。从经济数据看, 2012年北京市调入和调出总值分别是2007年的3.75和5.64倍, 虚拟水贸易变动趋势与其相符合。

图2是2012年北京市42个产业部门的国内贸易虚拟水调入调出情况。调入虚拟水量最多的是部门14 (SRM: 金属冶炼和压延加工品), 其同时也是调出虚拟水量第二高的部门, 与其贸易额在42部门中的排名一致。部门14的产品谱系较广且上游产品污染和耗能大, 北京市在调入大量上游产品的同时也调出了大量加工后的下游产品, 由此也引发了大量虚拟水资源的调入和调出。净调入虚拟水量最高的是部门10 (PPM: 造纸印刷和文教体育用品), 该部门由于生产过程耗水高且污染大, 自2008年起出现产业制造环节转移及从业人员下降、产值下降的现象^[29]。而北京市的居民生活需要大量此类产品, 单纯本地生产无法满足需求, 需要从国内其他地区调入, 由此引发了大量的虚拟水转移。

净调出虚拟水量最高的是部门3 (EPN: 石油和天然气开采产品), 净调出虚拟水量达52.9亿 m^3 , 占总净调出虚拟水量的近2/3。该产业2012年的总产出及直接用水量在北京市42部门中最低, 然而其调出额和进口额巨大 (在42部门中分列第一二位), 这说明其净调出的虚拟水主要来源于该部门进口产品隐含的虚拟水, 即该部门从世界其他国家进口了大量的虚拟水, 之后又调出到国内其他地区。这与北京市特殊的转口贸易形式有关, 即北京市在中国其他省市和世界其他国家中充当着重要的中间商或中转地角色, 从事大量“进口再调出”及“调入再出口”的贸易活动。根据学者金燕等^[30]的研究, 北京市每年约有3/5的进口商品是为了向其他地区调出而进口。部门3的主体为注册地在北京的国有企业, 受属地统计原则及总部经济的限制^[31], 该部门进口产品记于北京市的名下, 而实际上可能是其他省市在使用。北京市第三产业部门大多表现为虚拟水净调出, 这与北京市服务业发达、整体表现为产品净调出的情况相符, 但这些部门调入调出的虚拟水量都比较小, 对北京市整体虚拟水贸易影响不大。

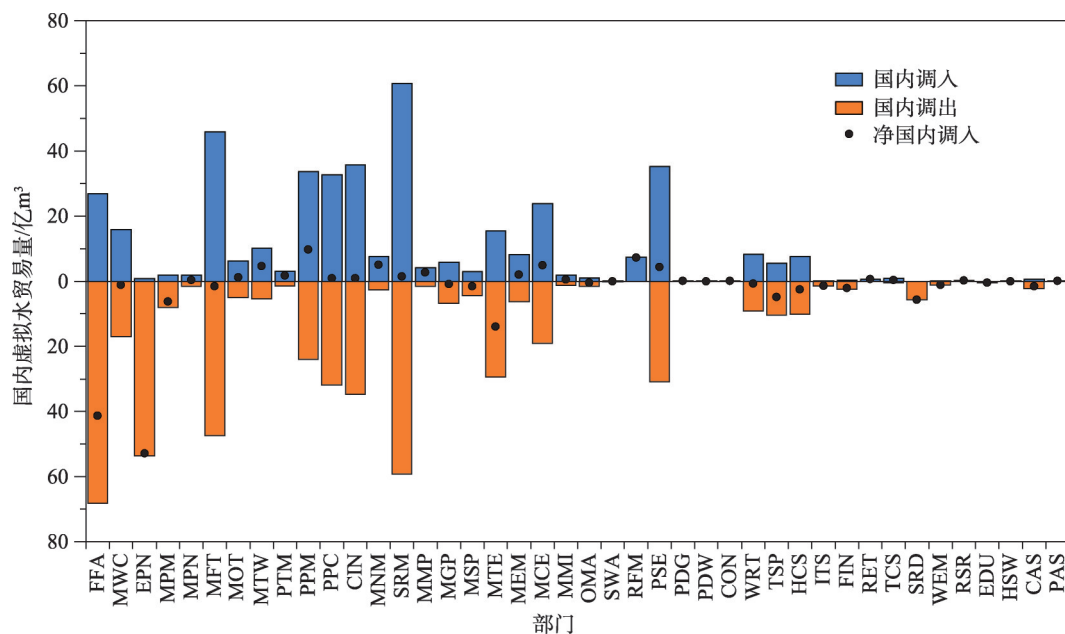


图2 北京市2012年42部门国内虚拟水贸易

Fig. 2 Virtual water transfer in domestic trade of Beijing in 2012

2007年北京市调入及调出虚拟水最多的是部门6 (MFT: 食品和烟草部门)。虽然该部门2012年调入水量相对于2007年增长近1.6倍, 调出水量增长约3.5倍, 但仅排在2012年调入虚拟水量的第二名和调出虚拟水量的第四名。这说明2012年北京市的国内虚拟水贸易结构发生了显著变化。除此之外, 2007年净调入虚拟水最多的部门1 (FFA: 农林牧渔产品和服务部门) 在2012年转变为净调出, 且在所有部门中排名第二。而2007年净调出水量最多的部门29 (WRT: 批发与零售部门) 在2012年净调出水量减少超过80%, 将更多的产品与相应的虚拟水资源留在了本地。

图3是北京市所有产业部门在国际贸易中的虚拟水进出口情况。2012年北京市从世界其他国家进口了235.0亿 m^3 虚拟水, 是2007年的5.52倍, 与贸易量变动趋势一致 (增长4.36倍)。出口虚拟水为36.2亿 m^3 , 相对2007年变动不大。在42个部门中, 只有12个部门 (FFA、EPN、SRM、MFT、MTE、MPM、CIN、PPC、MGP、MMI、MWC、MSP) 的虚拟水贸易量比较显著 (各部门净进出口水量均超过1亿 m^3), 其余部门进出口水资源量相对较小。

2012年北京市进口及净进口虚拟水最多的是部门1 (FFA: 农林牧渔产品和服务部门), 该排名与2007年保持一致, 但其进口与净进口虚拟水量分别是2007年的6.3倍和7.7倍。可以看出, 2012年该部门与世界其他国家的虚拟水联系更为紧密。同时该部门2012年在国内虚拟水贸易调出量及净调出量中分列第一名和第二名, 这说明该部门进口的产品中有很一部分没有供本地使用, 而是调往了其他省市, 这也主要是由北京市的转口贸易形式导致的, 北京市通过“进口再调出”的方式满足了其他省市的需求。2007年与高新技术产品相关的部门19 (MEM: 电子机械和器材) 是出口虚拟水最多的部门, 而2012年部门36 (SRD: 科学研究和技术服务) 超越部门19成为出口虚拟水最多的部门。

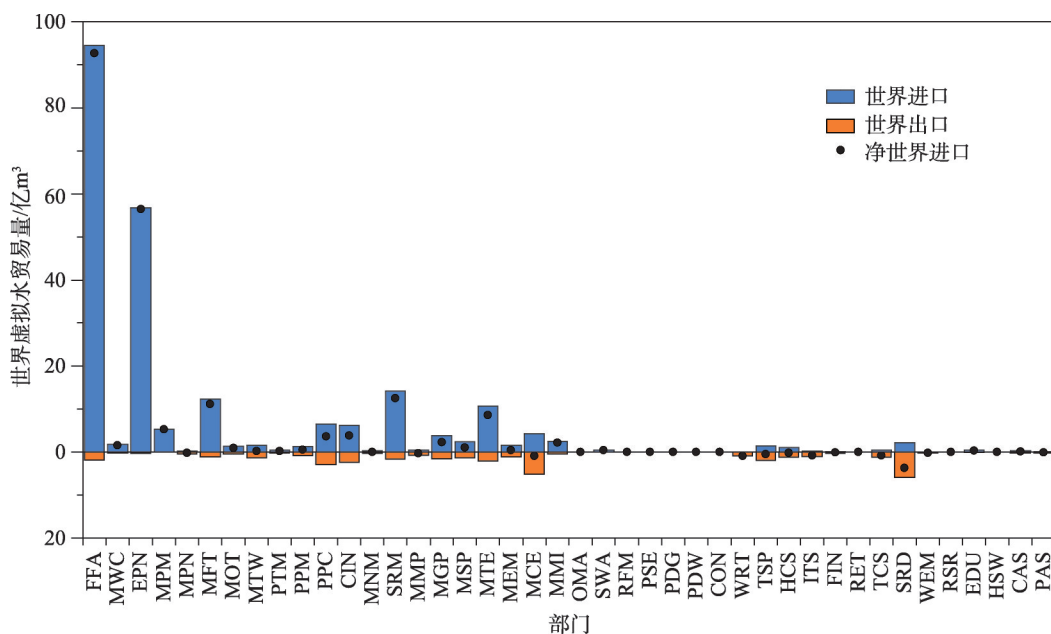


图3 北京市2012年42部门国际虚拟水贸易

Fig. 3 Virtual water transfer in international trade of Beijing in 2012

2.3 虚拟水贸易效应与北京市水安全

为缓解北方用水压力, 国务院于2002年正式开始实施南水北调工程建设。2008-2012年, 南水北调先期建设完成的京石段工程从河北省向北京市调入了13.8亿 m^3 的实体水资源^[32], 为缓解北京市的用水紧张及地下水不足问题作出了重要贡献。根据本文研究结果, 北京市仅2012年一年就净输入了103.6亿 m^3 虚拟水。可以看出, 虚拟水为缓解北京市水资源短缺作出了更为显著的贡献。目前北京针对直接用水已出台较多政策, 如《北京市节约用水办法》和《关于北京市居民用水实行阶梯水价的通知》等, 通过制定各行业用水定额、对用水单位严格计量用水量及定期检查、对居民严格执行阶梯水价制度等来对行业和居民用水进行监管, 从而达到减少直接用水的目的。作为直接用水政策的补充, 北京市亟需从虚拟水角度提出相关政策, 即将虚拟水战略作为解决北京市水资源危机的一种新途径^[33], 为北京市水资源高效利用作出更大贡献。

如图4所示, 2012年北京市总水资源使用量为684.5亿 m^3 , 是2007年(213.5亿 m^3)的3.21倍, 其中调入、调出、进口及出口水资源量分别是2007年的2.84倍、7.84倍、6.53倍和1.08倍。由此可见, 北京市与世界国家和中国其他省市的虚拟水联系变得更为紧密。从虚拟水流入来看, 2012年本地直接水资源开采使用量、从国内调入及国外进口的虚拟水量分别占北京市总水资源使用量的5.24%、60.42%和34.34%。2007年该比例分别为15.03%、68.11%和16.86%, 这说明北京市对进口水资源的依赖性有所加强。虚拟水流出方面, 在2012年与北京市相关的全部水资源中, 有约1/4被本地消费, 近3/4被调出到中国的其他省市地区, 仅有6%被出口到其他国家。而2007年北京使用的全部水资源中, 有超过1/2被本地消费、约30%被调出、17%被出口。由此可以看出, 北京市虚拟水的主要利用方式由2007年的本地消费转变为2012年的调出。

综合而言, 2012年北京市虚拟水贸易情况与2007年相比发生显著转变: 在国内贸易中由净调入转为净调出, 且2012年净调出量(92.3亿 m^3)为2007年净调入量(80.8亿 m^3)的1.14倍; 而在国际贸易中由净出口转为净进口, 且2012年的净进口量(195.9亿 m^3)为2007年净出口量(0.2亿 m^3)的837.20倍。相对于2007年将水资源消耗转移到中国其他省市、利用其他省市的水资源满足自己的消费需求, 北京市2012年利用进口的水资源满足了本地不断增长的消费需求, 从而减少了对本地稀缺水资源的过度开采。与此同时, 北京市还扮演了“中转商”的角色, 将进口的水资源反哺输送到其他省市, 这一举动有助于节约国内其他省市水资源的使用。因此, 从国家整体角度出发, 北京市今后应当继续增加进口, 以达到利用世界其他国家的水资源来缓解国内水资源紧张局面的目的。

目前北京市净进口虚拟水较大(大于3亿 m^3)的产业有部门1

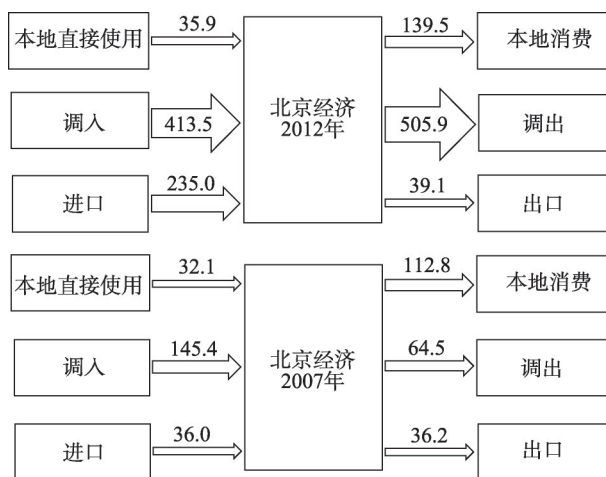


图4 北京市2007年及2012年虚拟水流入及流出(亿 m^3)

Fig. 4 Virtual water inflows and outflows of Beijing in 2007 and 2012 (10⁸ m³)

(FFA: 农林牧渔产品和服务)、部门3 (EPN: 石油和天然气开采产品)、部门14 (SRM: 金属冶炼和压延加工品)、部门6 (MFT: 食品和烟草)、部门4 (MPM: 金属矿采选产品)、部门12 (CIN: 化学产品) 和部门10 (PPC: 石油、炼焦产品和核燃料) 等。这些部门中, 部门1和部门6由于涉及粮食供应安全问题不应被过度鼓励增加进口。能源和矿产资源安全供应对于北京乃至我国经济的稳定发展同样至关重要, 因此在增加部门3、部门14、部门4和部门10的进口时应该坚持进口国和进口方式多元化的原则^[34], 防止受地缘政治风险等因素牵连出现供应危机。近年来中国对铁矿石、铜、铝等金属资源产品的对外依存度不断增加, 但国际市场矿产资源产品价格波动剧烈, 因此在进口时也可适当考虑利用期货期权产品, 在节约本地水资源的同时防范价格风险^[35]。部门12存在着国内产能过剩的情况^[36], 相关产品的大量进口容易加剧国内供需不平衡的状况, 因此应当有选择性地增大国内技术达不到、供给不足的部分相关产品的进口, 可用国内产品替代的则应选择从国内其他省市调入。除此之外, 北京市应适当增加部门28 (CON: 建筑) 和部门18 (MTE: 交通运输设备) 等世界强度较低且本地消费量较高的产品的进口, 这样能够实现用较少的水资源生产同样的产品的效果, 有利于全球范围内水资源的节约利用。

3 结论与讨论

水资源短缺已成为制约北京市可持续发展的重要瓶颈之一。北京市作为国际性大都市和我国的政治经济中心, 其密集的对外贸易行为造成了大量水资源的虚拟转移。因此对北京市社会经济中的水资源使用, 尤其是对对外贸易 (包括调入调出贸易和进出口贸易) 虚拟水资源的转移进行系统模拟, 对了解北京市水供应链现状及提出科学高效的节水政策有重要意义。本文基于多尺度投入产出分析法对2012年北京市虚拟水消费量和贸易量进行了研究, 在对比分析的基础上提出了相应的政策建议, 相关结论如下:

(1) 从虚拟水消费角度来看, 北京市2012年基于消费的虚拟水用量 (139.5亿 m^3) 是基于生产的直接用水量 (35.9亿 m^3) 的3.89倍, 对比2007年虚拟水消费比直接用水增长快了将近一倍。在北京市本地最终消费中, 城镇居民消费引发了最多的水资源消耗, 其人均消费的虚拟水远超农村居民。与此同时, 2012年北京市城乡居民的人均虚拟水消费量较2007年增长约20%, 人民日益增长的生活水平造成了更多的水资源消耗。可以看出, 北京市的消费驱动了大量北京市以外地区的水资源使用, 由此也引发了大量的虚拟水转移。北京市目前已出台的水资源管理政策大多针对直接用水或实体水, 未来有必要加强对基于消费的虚拟水战略的关注。

(2) 从虚拟水贸易角度来看, 北京市2012年从世界进口、向国内其他区域调入调出的虚拟水量分别是2007年的6.53、2.84倍和7.84倍, 出口虚拟水变动不大; 北京市与世界其他国家和中国其他省份的虚拟水联系更加紧密。就部门而言, 北京市目前调入虚拟水最多的是部门14 (SRM: 金属冶炼和压延加工品), 进口及净进口虚拟水最多的是部门1 (FFA: 农林牧渔产品和服务部门)。由于北京市转口贸易现象的存在, 部门3 (EPN: 石油和天然气开采产品) 和部门1 (FFA: 农林牧渔产品和服务部门) 进口并调出了大量的虚拟水资源。

(3) 2012年北京市虚拟水贸易情况与2007年相比发生了巨大转变: 国内贸易由2007年的虚拟水净调入变为净调出 (净调出量为净调入量的1.14倍), 而国际贸易由2007年

的虚拟水净出口变为净进口(净进口量为净出口量的837.20倍)。与此同时,2012年北京市水资源总使用量是2007年的3.21倍,其中有约1/4被本地消费,近3/4被调出到中国的其他省市地区,仅有6%被出口到其他国家。而2007年有超过1/2被本地消费、近30%被调出、17%被出口。可以看出,2012年北京市一方面通过增加进口有效避免了本地水资源过度开采,另一方面通过转口贸易的形式将进口水资源调出到中国其他省市,为缓解国内水资源紧张局面作出了贡献。北京市今后应当优化贸易结构,在综合考量国内能源矿产资源的供应安全和合理配置国内过剩产品的情况下,以进口国和进口方式多元化为原则,有策略性地增加石油、矿产资源和化工产品等的进口,以节约国内水资源。同时北京市还应当增加建筑、交通运输设备等部门等本地水资源密集型产品的进口,以在全球范围内更高效地利用水资源。

参考文献(References):

- [1] 刘冀宏,沈秀英.北京市缓解农业用水紧缺的途径.北京水务,2004,28(6):29-30. [LIU J H, SHEN X Y. The approach to alleviate the shortage of water in agriculture in Beijing. Beijing Water, 2004, 28(6): 29-30.]
- [2] ALLAN J A. Virtual water: A strategic resource. Ground Water, 1998, 36(4): 545-547.
- [3] 孙艳芝,鲁春霞,谢高地,等.北京市水足迹.生态学杂志,2015,34(2):524-531. [SUN Y Z, LU C X, XIE G D, et al. Water footprint in Beijing. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(2): 524-531.]
- [4] 李锋,王春月.虚拟水贸易视角下的水资源安全研究综述.河海大学学报:哲学社会科学版,2014,16(2):49-54. [LI F, WANG C Y. Research review of water security from the perspective of virtual water trade. Journal of Hohai University: Philosophy and Social Sciences, 2014, 16(2): 49-54.]
- [5] 赵旭,杨志峰,陈彬.基于投入产出分析技术的中国虚拟水贸易及消费研究.自然资源学报,2009,24(2):286-294. [ZHAO X, YANG Z F, CHEN B. Study on Chinese virtual water trade and consumption in an input-output framework. Journal of Natural Resources, 2009, 24(2): 286-294.]
- [6] YANG H, ZEHNDER A. "Virtual water": An unfolding concept in integrated water resources management. Water Resources Research, 2007, 43(12): W12301, Doi: 10.1029/2007WR006048.
- [7] ZHAO X, CHEN B, YANG Z F. National water footprint in an input-output framework: A case study of China 2002. Ecological Modelling, 2009, 220(2): 245-253.
- [8] 谭圣林,邱国玉,熊育久.投入产出法在虚拟水消费与贸易研究中的新应用.自然资源学报,2014,29(2):355-364. [TAN S L, QIU G Y, XIONG Y J. New application of the input-output framework in the study of virtual water consumption and trade. Journal of Natural Resources, 2014, 29(2): 355-364.]
- [9] 钱逸颖,董会娟,田旭,等.应对水资源危机的中国水足迹研究综述.生态经济,2018,34(7):162-166,173. [QIAN Y Y, DONG H J, TIAN X, et al. A review of the research on China's water footprint responding to water crisis. Ecological Economy, 2018, 34(7): 162-166, 173.]
- [10] LEONTIEF W W. Quantitative input and output relations in the economic systems of the United States. The Review of Economic Statistics, 1936, 18(3): 105-125.
- [11] CHEN Z M, CHEN G Q. Virtual water accounting for the globalized world economy: National water footprint and international virtual water trade. Ecological Indicators, 2013, 28(s1): 142-149.
- [12] GUAN D, HUBACEK K. Assessment of regional trade and virtual water flows in China. Ecological Economics, 2007, 61(1): 159-170.
- [13] LENZEN M, MORAN D, BHADURI A, et al. International trade of scarce water. Ecological Economics, 2013, 94: 78-85.
- [14] 王晓萌,黄凯,杨顺顺,等.中国产业部门水足迹演变及其影响因素分析.自然资源学报,2014,29(12):2114-2126. [WANG X M, HUANG K, YANG S S, et al. Temporal variability and influencing factors of sectoral water footprint in China. Journal of Natural Resources, 2014, 29(12): 2114-2126.]
- [15] ZHAO X, LIU J, YANG H, et al. Burden shifting of water quantity and quality stress from megacity Shanghai. Water Resources Research, 2016, 52(9): 6916-6927.
- [16] GUO S, SHEN G, PENG Y. Embodied agricultural water use in China from 1997 to 2010. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 3176-3184.

- [17] JIANG Y, CAI W, DU P, et al. Virtual water in interprovincial trade with implications for China's water policy. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 87: 655-665.
- [18] SHAO L, GUAN D, WU Z, et al. Multi-scale input-output analysis of consumption-based water resources: Method and application. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 164: 338-346.
- [19] SHAO L, GUAN D, ZHANG N, et al. Carbon emissions from fossil fuel consumption of Beijing in 2012. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(11): 114028, Doi: 10.1088/1748-9326/11/11/114028.
- [20] DENG G, MA Y, LI X. Regional water footprint evaluation and trend analysis of China-based on interregional input-output model. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 4674-4682.
- [21] CHEN G Q, CHEN H, CHEN Z M, et al. Low-carbon building assessment and multi-scale input-output analysis. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2011, 16(1): 583-595.
- [22] HAN M Y, CHEN G Q, MUSTAFA M T, et al. Embodied water for urban economy: A three-scale input-output analysis for Beijing 2010. *Ecological modelling*, 2015, 318: 19-25.
- [23] LIU S, WU X, HAN M, et al. A three-scale input-output analysis of water use in a regional economy: Hebei province in China. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 156: 962-974.
- [24] HAN M, DUNFORD M, CHEN G, et al. Global water transfers embodied in mainland China's foreign trade: Production- and consumption-based perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 161: 188-199.
- [25] 孙才志, 姜坤, 赵良仕. 中国水资源绿色效率测度及空间格局研究. *自然资源学报*, 2017, 32(12): 1999-2011. [SUN C Z, JIANG K, ZHAO L S. Measurement of green efficiency of water utilization and its spatial pattern in China. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(12): 1999-2011.]
- [26] 杨胜敏. 北京农业微灌技术的节水潜力分析. *水利水电技术*, 2011, 42(11): 85-87. [YANG S M. Analysis on water-saving potential of micro-irrigation technology for agriculture in Beijing. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2011, 42(11): 85-87.]
- [27] 李瑾, 孙留萍. 北京发展节水农业的思考. *黑龙江农业科学*, 2015, 37(12): 155-160. [LI J, SUN L P. Thinking of the development of water-saving agriculture in Beijing. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2015, 37(12): 155-160.]
- [28] 左建兵, 刘昌明, 郑红星. 北京市电力行业用水分析与节水对策. *给水排水*, 2008, 34(6): 56-60. [ZUO J B, LIU C M, ZHENG H X. Analysis on water consumption and water saving countermeasures of thermal power industry in Beijing. *Water & Wastewater Engineering*, 2008, 34(6): 56-60.]
- [29] 叶振宇, 叶素云. 北京市产业对外疏解的现实思考. *城市*, 2015, 27(1): 20-25. [YE Z Y, YE S Y. Realistic countermeasure of the external relief of Beijing's industry. *City*, 2015, 27(1): 20-25.]
- [30] 金燕, 王寅. 北京市转口贸易动态特征研究. *国际贸易问题*, 2009, 34(9): 38-42. [JIN Y, WANG Y. Dynamic characteristics in entrepot trade of Beijing. *Journal of International Trade*, 2009, 34(9): 38-42.]
- [31] 金燕, 张京宇. 国有企业对北京转口贸易优势的影响: 基于中国石油技术开发公司的调研分析. *国际商务: 对外经济贸易大学学报*, 2011, 24(4): 28-36. [JIN Y, ZHANG J Y. Effect of state-owned enterprise on entrepot trade of Beijing: Survey and reference based on China petroleum technology & development corporation (CPTDC). *International Business*, 2011, 24(4): 28-36.]
- [32] 中国南水北调工程. 京石段工程第四次向北京调水. http://www.nsb.gov.cn/zx/mtgz/201211/t20121127_250941.html. [South-to-North Water Diversion Project. The Beijing-Shijiazhuang section of the South-to-North Water Diversion Middle Route Project transfers water into Beijing for the fourth time. http://www.nsb.gov.cn/zx/mtgz/201211/t20121127_250941.html.]
- [33] 刘雅婷, 王赛鸽, 陈彬. 基于投入产出分析的北京市虚拟水核算. *生态学报*, 2018, 38(6): 1930-1940. [LIU Y T, WANG S G, CHEN B. Virtual water analysis for Beijing based on input-output model. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(6): 1930-1940.]
- [34] 孔祥永, 杨强. 美国“能源新现实主义”的地缘政治冲击与中国的应对. *当代世界与社会主义*, 2019, 137(1): 149-156. [KONG X Y, YANG Q. The geopolitical impact of American "New Energy Realism" and China's response. *Contemporary World and Socialism*, 2019, 137(1): 149-156.]
- [35] 何红想. 中国大宗资源性产品进口规模影响因素研究. 广州: 暨南大学, 2016. [HE H X. Research of the influence factors of China resource products import scale: Take iron ore import as an example. Guangzhou: Jinan University, 2016.]
- [36] 孙康, 李婷婷. 中国石化产业产能过剩测度及预警. *财经问题研究*, 2015, 378(5): 29-34. [SUN K, LI T T. The measurement and alert of Chinese petrochemical industry's excess capacity. *Research on Financial and Economic Issues*, 2015, 378(5): 29-34.]

Virtual water consumption and trade of Beijing

WEI Yi-ran¹, SHAO Ling¹, ZHANG Bao-gang², XU Pei-qi¹, QIN Jing-min¹

(1. School of Economics and Management, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: As a city suffering from serious water resources shortage, Beijing is in urgent need to improve water use efficiency. Based on the method of multi-scale input-output analysis, this work calculates and analyzes the virtual water consumption and trade of Beijing in 2012, and compares the results to that of 2007. The results indicate that the consumption-based water resources use of Beijing were estimated up to 13.95 billion m³ in 2012, which were 3.89 times larger than the production-based direct water resources use (3.59 billion m³). Compared with 2007, the virtual water consumption (23.7%) grew faster than direct water use (11.8%). For all water resources related to Beijing, only 5% was from local water withdrawal, while more than 3/5 was domestically imported from other Chinese regions and about 35% was imported from foreign countries. Meanwhile, about 1/5 of these water resources was consumed to meet Beijing's local final demand, approximately 3/4 was exported to other domestic regions, and 6% was exported to other countries. Beijing changed from a net domestic virtual water importer in 2007 into a net exporter in 2012, and the net domestically exported virtual water in 2012 was 1.1 times larger than the net import in 2007. On the other hand, Beijing changed from a net international virtual water exporter in 2007 into a net importer in 2012, and the net international virtual water import (19.60 billion m³) was 837.2 times larger than the net export (0.02 billion m³) in 2007. Beijing net imported 10.36 billion m³ virtual water in 2012 (all from international trade), which has successfully avoided the over- withdrawal of local water resources. At the same time, Beijing re-exported plenty of internationally imported virtual water to other Chinese regions, which has contributed a lot to alleviate domestic water shortage pressure. In order to reduce domestic water resources use and improve water use efficiency worldwide, Beijing is suggested to strategically increase the international import of mineral, energy, construction and transportation equipment products under the consideration of energy and mineral resource supply security, and to absorb domestic excess capacity in the future.

Keywords: virtual water; multi-scale input-output analysis; virtual water consumption; virtual water trade; Beijing