

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2021.0089

姜珊,秦长海,朱永楠,等.北京市虚拟水消费与贸易分析[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(5):853-861. JIANG S, QIN C H, ZHU Y N, et al. Analysis on the characteristics of virtual water consumption and trade[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(5): 853-861. (in Chinese)

北京市虚拟水消费与贸易分析

姜珊,秦长海,朱永楠,王庆明,王丽珍,何国华

(中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038)

摘要:为真实反映地区水资源承载状况,需要从产业结构和商品贸易的角度分析地区虚拟水消费情况。以北京市为研究区,基于北京市投入产出表,对比分析 2007、2012、2017 年不同生产部门用水系数、虚拟水终端消费和贸易情况以及部门间虚拟水转移量。结果表明:随着北京市节水工作的推进,各部门的直接用水系数减小,近 10 年北京市虚拟水终端消费量减少 14%;作为虚拟水净流入城市,北京市虚拟水净流入量为 29.79 亿 m^3 ,占虚拟水终端消费量的 64.7%,其中农业和服务业分别是虚拟水最大净流入和净流出的部门;农业-制造业、农业-服务业、制造业-建筑业、制造业-服务业具有很强的虚拟水输出-输入关系,未来北京市节水工作不仅要减少农业的生产规模,而且要减少制造业、建筑业和服务业的产品消耗,减少终端消费浪费。

关键词:虚拟水;投入产出分析;虚拟水消费量;虚拟水贸易量;用水系数;北京

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



水资源短缺已经成为全球共性问题,根据《2019 年世界水资源发展报告》,自 20 世纪 80 年代初,全球用水量每年增长 1%,按照这个增长速度,预计 2050 年全球用水量将增加 20%~30%,将有超过 20 亿人口面临水危机^[1],中国缺水问题更为严峻。2018 年人均水资源量约为 2 036 m^3 ,北方大部分地区均在 1 000 m^3 以下^[2];400 多座城市存在缺水问题,全国现状正常年份缺水 500 亿 m^3 ^[3]。为了应对水资源短缺问题,中国开展了一系列“开源节流”工程和措施:一方面通过跨流域调水、淡化海水、积蓄雨水、利用再生水,拓展水源实现水资源再分配;另一方面通过建设节水型社会、调整产业结构和进出口贸易实现对水资源的可持续性分配,对缓解水资源短缺问题起到了重要的作用。

北京市位于海河流域,属于半干旱半湿润的大陆性季风气候,多年平均降水量 567 mm^[4]。自 20 世纪 90 年代,区域水资源持续衰减,用水量激增,

地下水超采严重。为缓解水资源短缺形势,2003 年北京市逐步推进再生水利用,2014 年南水北调通水,再生水和外调水在北京供水体系中逐渐发挥了巨大作用。2018 年北京市地表水、地下水、再生水、外调水分别占总供水量的 9%、42%、27%和 22%。随着北京市国家中心城市建设,对北京水资源承载能力提出更高要求,但本地人均水资源量仅为 137 m^3 ,已步入“水贫困”的警戒线^[5],水资源供需矛盾制约北京迈向世界城市的规模和速度。评估北京的水资源情况,不仅需要从实体水角度分析水资源条件,还要重视商品流通带来的虚拟水分配情况。根据 2007、2012、2017 年北京投入产出表,分析用水结构调整和节水管理对北京市不同部门直接用水系数、间接用水系数、用水乘数、终端虚拟水消费量、虚拟水进出口贸易量及部门间虚拟水流通量的影响,进而为缓解北京市水资源压力提供新思路。

收稿日期:2021-01-28 修回日期:2021-04-05 网络出版时间:2021-04-23

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.tv.20210423.1119.008.html

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFE0196000);国家自然科学基金项目(51809282)

作者简介:姜珊(1987—),女,山东威海人,工程师,博士,主要从事水与能源耦合模拟研究。E-mail:jiangs@iwhr.com

1 虚拟水研究现状

水资源以实体水和虚拟水的形式进入生产和生活环节,其中:在生产和生活过程中直接取用的淡水、淡化海水、再生水、苦咸水以及雨水等,是对实体水的利用;消费者在使用或消费产品过程中是对隐含在产品和服务中的虚拟水的利用。随着经济总量和商品流通规模日益增长,虚拟水管理得到越来越多关注。

20 世纪 90 年代初英国学者 Allan^[6] 最先提出“虚拟水”,Hoekstra^[7] 基于虚拟水的研究提出了“水足迹”;为客观掌握经济活动中各行业的水资源投入情况,Stoever 等^[8] 采用投入产出模型和效益成本分析法用于水资源经济研究;Carter 等^[9] 基于地区间投入产出表研究和分析水的利用和交换问题,之后越来越多的学者应用投入产出模型开展水资源管理方面的预测工作;Mubako 等^[10] 基于投入产出方法对美国加利福尼亚州和伊利诺斯州的水资源利用进行了评价,建议缺水地区在水资源管理中需要考虑用水效率和机会成本;Hosseini 等^[11] 通过建立投入产出模型,量化西北太平洋地区部门间的相互依赖性,提出为减少水-能源-粮食系统的环境影响,要更多利用地表水、水电和风电。

国内学者也基于投入产出模型开展虚拟水贸易与消费的相关研究:Chen 等^[12] 运用投入产出模型对中国虚拟水进口量情况进行深入分析,提出中国为缓解水资源短缺需要调整对外贸易结构;韩文钰等^[13] 利用世界投入产出表分析中美两国的虚拟水贸易特征;孙思奥等^[14] 以青藏高原为研究区,通过建立中国城镇与农村地区虚拟水贸易网络,分析青藏高原虚拟水贸易格局与结构,研究青藏高原对其他地区虚拟水贸易不平衡的影响因素。北京市作为我国水资源短缺最为严重的大城市之一,研究不同

行业水资源利用情况和内部流动关系是优化水资源配置的焦点议题。刘雅婷等^[15] 基于投入产出表,研究北京市各部门的用水关联程度,分析内部经济系统的虚拟水流动特征;王雪等^[16] 基于北京市投入产出表分析各产业部门用水效率,识别提高生态效率的关键部门。尽管北京市虚拟水研究受到广泛关注,但是以往研究集中在 2012 年以前,对近 10 年虚拟水研究较少,而 2014 年习近平总书记提出将科技创新中心作为北京核心功能之一,北京市产业向着高端化、服务化、集聚化、融合化、低碳化方向发展^[17],产业结构和用水效率有了较大改变。本文基于投入产出表构建北京市虚拟水核算模型,分析 2007、2012、2017 年北京市虚拟水消费与贸易情况,辨别北京市不同部门虚拟水流动特征。

2 研究方法 with 数据

2.1 研究区概况

北京市从 20 世纪末本地可供水量呈现衰减态势。根据 1999—2011 年水资源评价成果,北京市水资源量为 21.6 亿 m^3 ,比 1956—2000 年少了 42%,入境水量也由 1956—2000 年的 21.1 亿 m^3 锐减到 4.7 亿 m^3 。为保障首都经济社会的稳定发展,南水北调通水和再生水的积极利用改变了北京市的供水结构,但是北京市水资源仍开发过度,水资源开发利用已经高达 112%。近年来北京市持续开展综合节水工作,抑制了用水总量的迅速增长,用水结构明显改变,见图 1,用水结构呈现“两增两减”的趋势。伴随着非首都功能的疏解和高耗水重工业的向外搬迁,工业用水和农业用水因用水效率提高且受严格管控影响,呈逐年下降趋势,占比分别由 30% 和 53% 下降到 9% 和 13%。生活用水受人口规模膨胀、生活质量提高的影响,用水量持续上升,占比由 17% 提升到 46%。

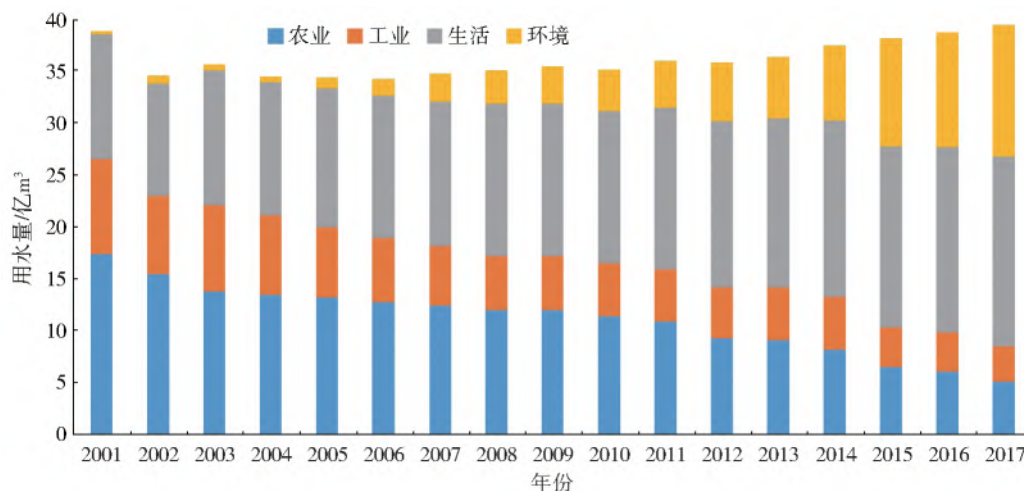


图 1 2001—2017 年北京市用水结构变化

Fig. 1 Water use structures in Beijing from 2001 to 2017

2.2 数据来源

为分析用水结构调整对北京市虚拟水消费和贸易的影响,基于2007、2012、2017年《北京市投入产出表》,将原有IO表(input-output table)中的42个部门合并为8个部门,分别为农业、矿业、制造业、电气供应业、水供应业、建筑业、交通业和服务业。为消除价格变动因素的影响,根据不同部门的价格指数将投入产出表的投入产出资金统一为2007年基准可比价格。水资源数据中农业、建筑业、交通业、服务业用水量依据《北京市水务年鉴》。北京市矿业、制造业、电力用水数据来自北京市水务局调查,以及参考北京市《第一次水务普查公报》(2011年)和段志刚等^[18]、车建明等^[19]关于北京市工业部门用水分析。水供应业用水量根据北京市供水统计年鉴获得。

2.3 北京市虚拟水投入产出模型

采用投入产出分析法研究北京市虚拟水消费与贸易情况。该方法基于北京市投入产出表,增加水

资源利用分析模块,将各行业生产过程的水资源直接投入纳入到投入产出表中,形成北京市水资源投入产出表。表1为基本的投入产出表形式,第I象限从行向看为中间产品使用去向,从列向看为中间投入来源,第II象限为最终产品使用去向,第III象限为增加值构成。在此基础上增加用水量一行,表示各行业生产过程中直接水资源投入量。

$$X_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} + \sum_{l=1}^3 y_{il} + V_i + E_i + I_i \quad (1)$$

式中: X_i 为第*i*部门经济总产出,在投入产出表中总投入(X_i)等于总产出(X_j); x_{ij} 为*i*部门提供给*j*部门货物或服务的价值量($i, j=1, 2, \dots, n$); y_{il} 为*i*部门对最终需求*l*的投入量;*l*分别为城镇居民、农村居民和政府消费; V_i 为*i*部门资本形成总额; E_i 为*i*部门流出量(包括出口和国内省外流出); I_i 为*i*部门流入量(包括进口和国内外省流入)。投入产出表主要体现各部门生产活动的投入来源和产出使用的经济量,单位为万元。

表1 北京市水资源投入产出表
Tab.1 Input-output table of Beijing's water consumption

产出		投入									总产出
		中间使用			最终使用						
		部门1	……	部门n	最终消费支出			资本形成总额	流出	流入	
中间投入/万元	部门1	$x_{1,1}$		$x_{1,n}$	$y_{1,1}$	$y_{1,2}$	$y_{1,3}$	V_1	E_1	I_1	X_1
	⋮		第I象限								
	部门n	$x_{n,1}$		$x_{n,n}$	$y_{n,1}$	$y_{n,2}$	$y_{n,3}$	V_n	E_n	I_n	X_n
增加值/万元		V_1	第III象限	V_n							
总投入/万元		X_1		X_n							
用水量/ m^3		W_1		W_n							

2.3.1 直接消耗系数

第*j*产品(或产业)部门的生产单位产品过程中,*i*产品部门对其直接投入量,被称为直接消耗系数 a_{ij} ^[20],公式为

$$a_{ij} = \frac{x_{ij}}{X_j} \quad (2)$$

基于直接消耗系数,提出直接用水系数 f_i , m^3 /万元,即第*j*产品(或产业)部门生产单位产品所需要消耗的水资源量,反映不同经济部门生产过程对水资源的直接利用情况,其公式为

$$f_i = \frac{W_i}{X_i} \quad (3)$$

式中: W_i 表示*i*部门生产消耗的水资源量,亿 m^3 。

2.3.2 完全消耗系数

完全用水系数指生产单位最终产品所消耗的全

个系统的水资源量, m^3 /万元。根据投入产出表完全消耗系数与直接消耗系数的平衡关系,完全用水系数 \bar{f}_j 与直接用水系数 f_j 关系为

$$\bar{f}_j = f_j + \sum_{i=1}^n \bar{f}_i a_{ij} \quad (4)$$

对公式(4)进行变换,用矩阵形式表示,得出完全用水系数计算公式为

$$\bar{f}_j = f_j (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \quad (5)$$

式中: \mathbf{I} 为*n*阶单位矩阵; $\mathbf{A} = |a_{ij}|$ 。

2.3.3 用水乘数

为反映*j*产品(或行业)部门消费对经济系统用水情况的影响,提出用水乘数 L ,等于完全用水系数与直接用水系数的比值^[21],表示消费某一产品(或行业)生产单位最终产品,带动整个经济系统用水增

加的倍数,用水乘数越大,表示间接消耗其他行业虚拟水量越大。

$$L = \frac{\bar{f}_j}{f_j} \quad (6)$$

2.3.4 虚拟水消费量

本地消费部门包括城镇居民消费、农村居民消费、政府消费以及资本形成,消费部门虚拟水消费量等于各消费部门对各行业最终使用产品量与完全用水系数的乘积,计算各行业本地最终产品虚拟水通量 \bar{W}_i , 亿 m^3 , 计算公式为

$$\bar{W}_i = \left(\sum_{l=1}^3 Y_{il} + V_i \right) \bar{f}_i \quad (7)$$

2.3.5 虚拟水贸易量

一个地区与其他地区进行产品贸易,伴随着虚拟水的流通^[22]。地区虚拟水流出量等于该地区产品流出经济量乘以本地产品完全用水系数,虚拟水输入量等于产品流入经济量乘以本地产品完全用水系数,虚拟水净流通量是流出量与流入量之差, 亿 m^3 , 正数说明该地区为虚拟水净流出区, 负数代表该地区为虚拟水净流入区。

虚拟水流出量为

$$Q_E = \sum_{i=1}^n \bar{f}_i \cdot E_i \quad (8)$$

虚拟水流入量为

$$Q_I = \sum_{i=1}^n \bar{f}_i \cdot I_i \quad (9)$$

虚拟水净流通量为

$$Q_{net} = Q_E - Q_I \quad (10)$$

2.3.6 不同部门虚拟水转移量

产品(或产业) i 和 j 之间的虚拟水净通量为虚拟水转移量,主要分析不同部门之间水资源利用情况。

$$D = d_{ij} = \bar{f}_i x_{ij} \quad (11)$$

$$T = t_{ij} = d_{ij} - d_{ji} \quad (12)$$

式中: D 为完全用水矩阵; d_{ij} 表示 i 部门向 j 部门的虚拟水输出数量; d_{ji} 表示 j 部门到 i 部门的虚拟水输入量; T 代表部门虚拟水转移量矩阵; t_{ij} 代表 i 部门与 j 部门的虚拟水转移量。

3 结果与讨论

3.1 部门用水系数

随着节水技术推广和用水效率的提高,2007—2017年北京市亩均灌溉水量由225 m^3 下降到179 m^3 ,万元工业增加值用水量由28 m^3 下降到8.2 m^3 ,各部门的直接用水系数都呈下降趋势,见表2,说明节水政策有一定成效。农业的直接用水系数和完全用水系数在8个部门中最大,农业直接用水系数和完全用水系数从2007年的455.5 m^3 /万元和716 m^3 /万元分别下降到2017年的180.5 m^3 /万元和222.1 m^3 /万元,且农业用水乘数由1.6下降到1.2,说明北京市农业发展带动其他行业用水增加影响减弱。2017年水供应业和矿业的用水乘数也均接近1,说明这2个部门需要其他部门投入原料不大。矿业和水供应业的直接用水系数约占完全用水系数的50%以上,说明这2个部门为其他部门生产提供原料。交通业、建筑业和制造业的直接用水系数较小,但完全用水系数较大,所以这3个行业的用水乘数分别为8个部门中的前3,说明这2个部门虽然生产过程中直接水消耗不大,但间接使用其他行业的虚拟水较大,其单位产品的增加将带动其他部门水资源消耗。电气供应业和服务业的直接用水系数约占完全用水系数20%以下,说明其服务、生产过程中隐藏的虚拟水消费同样不容小觑。

表 2 2007、2012、2017 年北京市不同部门用水系数变化情况

Tab. 2 Water use coefficient at the sectoral level of Beijing in 2007, 2012 and 2017

部门	2007 年			2012 年			2017 年		
	直接用水系数/ ($m^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)	完全用水系数/ ($m^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)	用水 乘数	直接用水系数/ ($m^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)	完全用水系数/ ($m^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)	用水 乘数	直接用水系数/ ($m^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)	完全用水系数/ ($m^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)	用水 乘数
农业	455.5	716.0	1.6	235.0	307.4	1.3	180.5	222.1	1.2
矿业	30.9	81.9	2.7	3.0	31.8	7.0	13.9	25.5	1.8
制造业	3.6	63.9	17.8	2.0	28.9	14.5	1.6	17.9	10.9
电气供应业	22.6	71.9	3.2	3.8	25.6	6.2	1.4	12.3	9.0
水供应业	89.7	131.1	1.5	62.3	79.9	1.3	30.4	37.3	1.2
建筑业	2.1	49.5	23.3	1.0	24.2	24.5	0.6	14.3	24.1
交通业	0.9	28.3	32.1	0.3	15.8	49.3	0.1	7.4	55.2
服务业	4.5	34.7	7.8	2.7	14.6	5.4	1.2	7.6	6.3

3.2 虚拟水消费量对比

根据近 10 年北京市本地终端消费经济占比分析,见图 2,北京市本地消费结构大体一致:服务业是终端消费最大部门,由 52.7% 上升到 64.5%;其次是建筑业和制造业,分别从 24.4% 和 19.2% 下降到 11.9% 和 17.5%;农业的消费由 1.7% 上升到 2.9%。2007—2012 年北京市本地终端消费增加 58.6%,供水量从 34 亿 m^3 上升到 35.9 亿 m^3 ,万元 GDP 用水量下降 41.2%,终端消费虚拟水总量从 53.73 亿 m^3 下降到 44.97 亿 m^3 ,说明用水效率的提高带来虚拟水消费量减少;2012—2017 年本地消费支出增加 38.3%,供水量上升到 39.5 亿 m^3 ,万元 GDP 用水量下降 30%,本地终端消费虚拟水总量上升到 46.01 亿 m^3 ,说明终端消费增加,尤其对高耗水产品的消费,带来终端虚拟水消费量的增加。

图 3 显示消费终端虚拟水消费占比,发现近 10 年资本形成消耗的虚拟水量占比从 42% 下降到 27%,城镇居民消费虚拟水量占比从 38.5% 上升到 59%,居民消费意愿愈发强烈。从不同消费部门消耗虚拟水情况来看:近 10 年服务业虚拟水消费量占

终端消费所需虚拟水量的 32.8% 下降到 30%;农产品消耗虚拟水从 21% 上升到 39%,说明北京市对农产品的消费越来越多,尤其城镇居民对农产品消费所需虚拟水量占城镇居民消费虚拟水量的 60%;制造业和建筑业虚拟水消费量分别由 21.9% 和 21.6% 下降到 18.9% 和 10.3%。这说明在北京市本地消费终端,对农产品、服务业、制造业的需求旺盛,带来大量虚拟水量消耗,需要将这些部门作为重点节水对象。

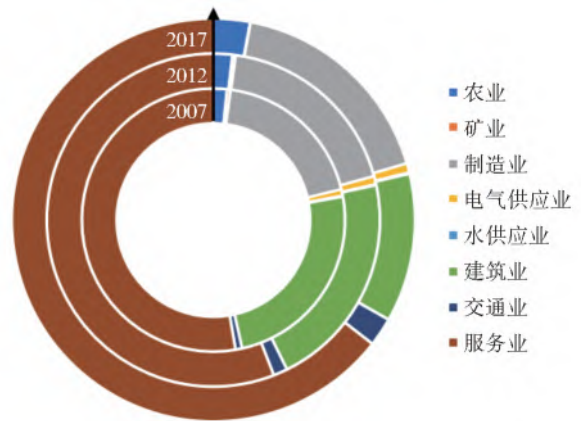


图 2 本地终端需求比例变化情况

Fig. 2 Changes in proportion of local final demands

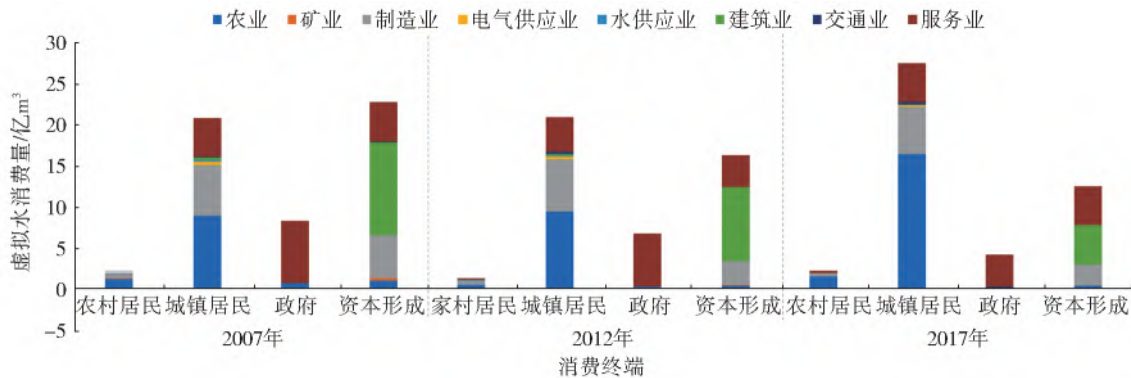


图 3 2007、2012、2017 年北京市终端虚拟水消费量

Fig. 3 Virtual water consumption at final demands of Beijing in 2007, 2012 and 2017

3.3 虚拟水贸易量对比

根据北京市 2007、2012 和 2017 年所有行业的虚拟水进出口贸易量计算:虚拟水流出量从 2007 年的 58.27 亿 m^3 增加到 2017 年的 136.6 亿 m^3 ;虚拟水流入量从 87.1 亿 m^3 增加到 166.39 亿 m^3 。净流量从 -28.82 亿 m^3 增长到 -29.79 亿 m^3 ,分别占全行业终端虚拟水消费量的 53.6% 和 64.7%,说明北京市产品消费主要依赖地区外供给。分析不同部门虚拟水流入情况(图 4),发现制造业是北京市虚拟水流出和流入最大部门,2007 年和 2017 年伴随制造业出口地区外,约 33.2 亿 m^3 和 61.7 亿 m^3 的虚拟水流出;而伴随制造业从地区外调入,约 33.2 亿 m^3 和 78.1 亿 m^3 的虚拟水流入。虚拟水净流量最大

部门为农业,虚拟水净流入量从 2007 年的 17.9 亿 m^3 增长到 2017 年 22.39 亿 m^3 ,分别占当年虚拟水净流入量的 62% 和 75%,说明虽然农业作为北京市虚拟水消耗量较大的部门,但是主要依靠地区外流入来满足其需求。服务业、交通业则是北京市虚拟水流出部门,2007—2017 年服务业净出口价值量增加 1.04 倍,虚拟水净流出量从 13.13 亿 m^3 下降到 5.87 亿 m^3 ,主要是由于服务业完全用水系数近 10 年下降 3.6 倍。交通业和服务业的完全用水系数远小于农业和制造业,其虚拟水消费量只占虚拟水总消费量的 9%。北京市控制高耗水产业,发展低耗水产业,从地区外调入农产品和制造业产品,向地区外提供服务业和交通业,在一定程度上缓解了水资源压力。

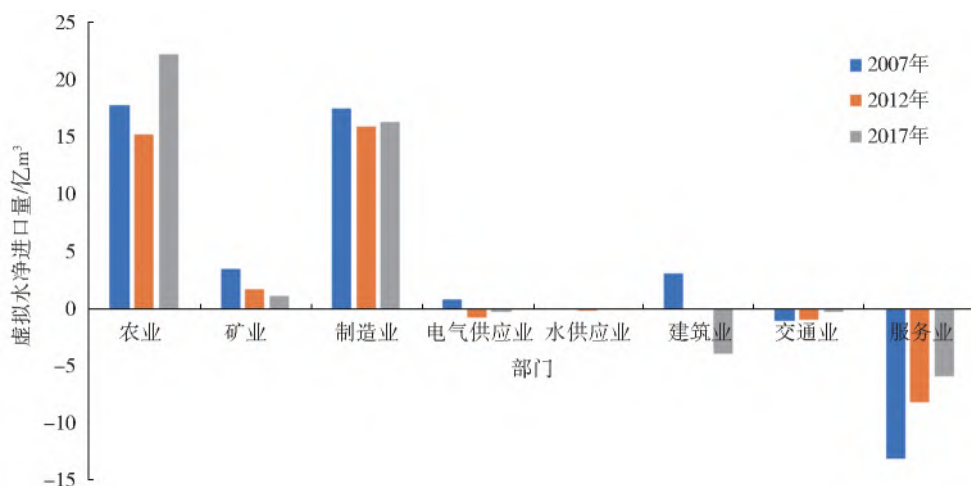


图 4 2007、2012、2017 年北京市虚拟水净进口情况
Fig. 4 Net virtual water import of Beijing in 2017, 2012 and 2017

3.4 不同部门虚拟水转移评价

对比分析 2007、2012、2017 年北京市 8 个部门间的虚拟水流动情况,见图 5,发现各部门间的虚拟水流动格局保持不变:农业、矿业、制造业、电气供应业、水供应业作为原料供应,是经济系统中虚拟水输出部门;建筑业、交通业和服务业作为消费部门,是虚拟水输入部门。2007—2017 年农业净输出虚拟水从 18.82 亿 m³ 下降到 9.82 亿 m³,其中流向制造业从 11.34 亿 m³ 下降到 6.4 亿 m³,流向服务业从 6.97 亿 m³ 下降到 2.3 亿 m³。近 10 年制造业虚拟水净输出量从 8.74 亿 m³ 上升到 10.07 亿 m³,2017

年制造业变为虚拟水输出最大部门,制造业向建筑业输出虚拟水从 7.05 亿 m³ 下降到 5.91 亿 m³,制造业向服务业输出虚拟水从 15.34 亿 m³ 下降到 10.37 亿 m³。农业-制造业、农业-服务业、制造业-建筑业、制造业-服务业、制造业-交通业、服务业-建筑业存在明显的虚拟水输出-输入关系,且农业-服务业、制造业-建筑业的关系逐渐减弱,农业-制造业的关系逐渐增强,这说明未来节水工作不仅要控制农业用水规模,也要重视部门间的关联性,提高制造业、服务业、建筑业等虚拟水终端输入部门的利用效率。

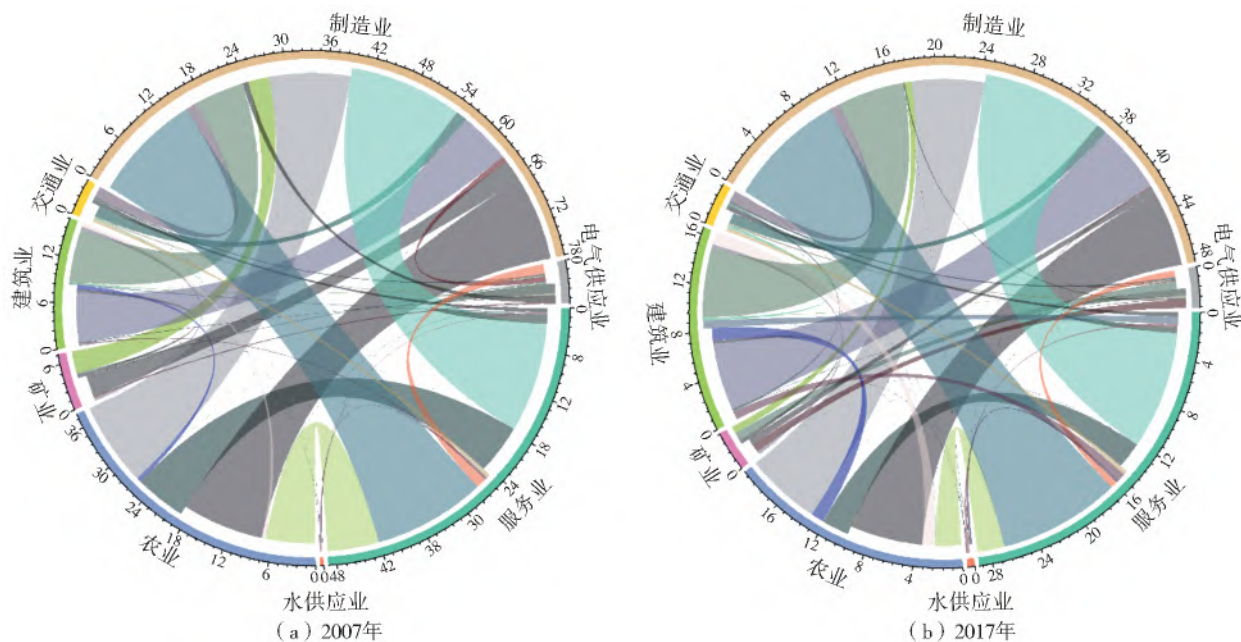


图 5 2007 和 2017 年北京市各部门虚拟水转移情况(单位:亿 m³)
Fig. 5 Virtual water flows among sectors of Beijing in 2007 and 2017(Unit:10⁸ m³)

4 结论与建议

北京作为特大型城市,以 21.6 亿 m³ 的本地水

资源量供养超过 2 000 万常住人口,每年南水北调通水和再生水的利用缓解了北京的缺水,同时,通过商品贸易带来的虚拟水流动改变了水资源在经济部

门和地区的分配关系,评估北京市这种超大城市的水资源状况需要从实体水和虚拟水的角度综合分析。基于北京市投入产出表,构建了北京市虚拟水核算模型,对比分析了2007、2012、2017年北京市8大部门直接、完全用水系数、用水乘数的演变趋势,研究了虚拟水终端消费量、进出口量和部门间转移量的变化情况,主要结论及建议:

(1)北京市的农业部门的直接用水系数和完全用水系数最大,但用水乘数接近1,说明农业直接消耗水资源量大,其他行业向农业虚拟水流入量少。交通业、建筑业、制造业、电气供应业和服务业直接用水系数虽然较小,但用水乘数较大,间接消耗其他行业的虚拟水量大。所以不仅要控制农业这样直接用水系数较大部门的用水规模,还需要在交通业、建筑业、制造业重视节水措施的实施。

(2)随着北京市节水工作的推进、用水效率的提高,各部门的直接用水系数减小,近10年北京市虚拟水消费量减少14%。资本形成消费虚拟水量占比从42%下降到27%,城镇居民消费虚拟水量从38.5%上升到59%,对农产品、服务业、制造业的需求旺盛,说明北京市各行业产品大部分被城镇居民消费,从而带来大量的虚拟水消耗。未来的节水工作不仅要在生产过程中推广节水技术,节约实体水的投入,而且还要关注消费终端虚拟水消费情况。

(3)作为虚拟水净流入地区,近10年北京市虚拟水净流量从-28.82亿 m^3 增长到-29.79亿 m^3 ,虚拟水净流入量约占全行业终端虚拟水消费量50%以上,在一定程度上提高了北京市水资源承载能力。通过净流入高耗水的农产品和矿产品,净流出低耗水的服务业,可以缓解北京市水资源压力,未来部门用水分配时应重点考虑第三产业的用水需求。

(4)北京市地区内部门间虚拟水输入-输出关联分析中,虚拟水净输出最大的部门由农业变为制造业,农业主要向制造业和服务业输出虚拟水,制造业主要向服务业和建筑业输出虚拟水;服务业部门是虚拟水净输入最大的部门,主要依靠农业和制造业的虚拟水输入。农业-制造业、农业-服务业、制造业-建筑业、制造业-服务业有很强的关联性,为减少水资源的利用,一方面需要控制农业产业规模,另一方面需要减少服务业和建筑业的产品消耗。

参考文献(References):

[1] The United Nations. World water development report

2019-leaving no one behind [R]. The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2019.

- [2] 中华人民共和国统计局. 2018年中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2019. (National Bureau of Statistics of China, China statistical yearbook 2018[M]. Beijing:China Statistics Press,2019. (in Chinese)).
- [3] 中华人民共和国水利部. 全国水资源综合规划[R]. 2011. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. National comprehensive plan for water resources [R]. 2011. (in Chinese)).
- [4] 白鹏,刘昌明. 北京市用水结构演变及归因分析[J]. 南水北调与水利科技,2018,16(4):1-6. (BAI P, LIU C M, Evolution law and attribution analysis of water utilization structure in Beijing[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4):1-6. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbddqk.2018.0090
- [5] 刘寒青,赵勇,李海红,等. 基于区间两阶段随机规划方法的北京市水资源优化配置[J]. 南水北调与水利科技,2020,18(1):48-55,151. (LIU H Q, ZHAO Y, LI H H, et al. Optimal water resources allocation based on interval two-stage stochastic programming in Beijing [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(1):48-55,151. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbddqk.2020.0005.
- [6] ALLAN J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible[A]. In ODA, Priorities for Water Resources Allocation and Management; ODA; London, UK, 1993.
- [7] HOEKSTRA A Y. Virtual water; an introduction. Virtual water trade. //Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade. Values of Water Research Report Series NO. 12 [C]. UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands, 2003.
- [8] STOEVENER H H, CASTLE E N. Input-output models and benefit-cost analysis in water resources research [J]. Journal of Farm Economics, 1965(5):1572-1599. DOI:10.2307/1236429.
- [9] CARTER H O, IRERI D. Linkage of California-Arizona input-output models to analyze water transfer pattern. //Carter P A and Brody A (eds) Applications of Input-Output Analysis [C]. Amsterdam: North-Holl and Publishing Company, 1970:139-168.
- [10] MUBAKO S, LAHIRI S, LANT C. Input-output analysis of virtual water transfers; Case study of California and Illinois[J]. Ecological Economics, 2013, 93 (SEP.):

- 230-238. DOI:10.1016/j.ecolecon.2013.06.005.
- [11] HOSSEIN TABATABAIE S M, GANTI S, MURTHY. Development of an input-output model for food-energy-water nexus in the Pacific Northwest, USA[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020. DOI: 10.1016/j.rcrx.2020.100047.
- [12] CHEN W, WU S, LEI Y, et al. 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 and Recycling, 2017; 278-290. DOI:10.1016/j.resconrec.2017.02.017.
- [13] 韩思钰, 张艳军, 张利平, 等. 基于投入产出分析的中美两国虚拟水贸易研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(12): 27-34 (HAN W Y, ZHANG Y J, ZHANG L P, et al. Virtual water trade between China and the United States based on input-output analysis[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(12): 27-34. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1007-2284.2020.12.005.
- [14] 孙思奥, 王晶, 戚伟. 青藏高原地区城乡虚拟水贸易格局与影响因素[J]. 地理学报, 2020(7): 1346-1358. (SUN S A, WANG J, QI W, Urban-and-rural virtual water trade of Qinghai-Tibet Plateau: Patterns and influencing factors[J]. Acta Geographica Sinica, 2020(7): 1346-1358. (in Chinese)) DOI: 10.11821/dlxb202007002.
- [15] 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[J]. 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[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 1930-1940. (in Chinese)) DOI:10.5846/stxb201612112547.
- [16] 王雪, 施晓清. 基于投入产出表的北京市产业生态效率[J]. 生态学报, 2018, 38(8): 2660-2671. (WANG X, SHI X Q, Industrial eco-efficiency of Beijing based on an input-output table[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(8): 2660-2671. (in Chinese)) DOI:10.5846/stxb201705150898.
- [17] 赵峥, 刘芸, 李成龙. 北京建设全国科技创新中心的战略思路与评价体系[J]. 中国发展观察, 2015(6): 77-81. (ZHAO Z, LIU Y, LI C L. Strategic consideration and evaluation system for Beijing to build a national science and technology innovation center[J]. China Development Observation 2015(6): 77-81. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: FZGC. 0. 2015-06-023.
- [18] 段志刚, 侯宇鹏, 王其文. 北京市工业部门用水分析. 工业技术经济, 2007, 26(4): 46-49. (DUAN Z G, HOU Y P, WANG Q W, Analysis on water consumption of industrial sector in Beijing[J]. Industrial Technology & Economy, 2007, 26(4): 46-49. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-910X.2007.04.013.
- [19] 车建明, 张春玲, 付意成, 等. 北京市工业用水特征与行业发展趋势分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2015, 13(2): 111-116. (CHE J M, ZHANG C L, FU Y C, et al. Analysis of industry developments trend and its water use characteristics in Beijing[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015, 13(2): 111-116. (in Chinese)) DOI:10.13244/j.cnki.jiwhr.2015.02.005.
- [20] 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[J]. 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[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(2): 286-294. (in Chinese)) DOI: 10.11849/zrzyxb.2009.02.013.
- [21] 孙才志, 杜杭成, 刘淑彬. 基于投入产出分析的辽宁省虚拟水消费与贸易研究[J]. 地域研究与开发, 2020, 192(2): 119-123, 128. (SUN C Z, DU H C, LIU S B. Analysis of virtual water consumption and trade in Liaoning Province based on input-output model[J]. Areal Research and Development, 2020, 192(2): 119-123, 128. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-2363.2020.02.021.
- [22] 刘宝勤, 封志明, 姚治君. 虚拟水研究的理论、方法及其主要进展[J]. 资源科学, 2006(1): 121-128. (LIU B Q, FENG Z M, YAO Z J. Theory, method and progress on virtual water research[J]. Resources Science, 2006(1): 121-128. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1007-7588.2006.01.020.

Analysis on the characteristics of virtual water consumption and trade

JIANG Shan, QIN Changhai, ZHU Yongnan, WANG Qingming, WANG Lizhen, HE Guohua

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,
China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Water scarcity has become a common global problem. As a mega-city, Beijing supports more than 20 million permanent residents with 2.16 billion m³ of local water resources. South-to-North Water Diversion and recycled water could resolve the cri-

sis of water resource shortage of Beijing effectively, while virtual water flow with commodity trade has also changed the distribution of water resources in economic sectors and regions, and played an important role in alleviating water shortages. To fully reflect water resources bearing capacity, it is required to analyze the virtual water consumption and trade from the perspective of industrial structure and commodity trade.

An urban virtual water accounting framework is proposed based on input-output table and the direct and complete water consumption coefficients of the 8 major departments of Beijing in 2007, 2012 and 2017 are analyzed under the background of industrial structure adjustment and water-saving work, as well as research the characteristics of sectoral virtual water consumption and virtual water flows among different sectors.

From 2007 to 2017, the direct water use coefficient of all sectors in Beijing shows a downward trend, the direct and complete water use coefficient of agriculture are largest, and complete water use coefficient drops from $716 \text{ m}^3/\text{¥}1\ 000$ in 2007 to $222.1 \text{ m}^3/\text{¥}1\ 000$ in 2017, the multiplier for agricultural water use declines from 1.6 to 1.2 which indicates the impact of agricultural development has weakened the increase in water use in other sectors. The direct water use coefficient of transportation, construction, and manufacturing sectors are small, but the water multiplier is large, and the increase in unit products of these will bring about water consumption in other sectors. In the past 10 years, the total local end use of virtual water has dropped from 5.37 billion m^3 to 4.5 billion m^3 , the virtual water consumption in the service industry accounts for total virtual water consumption decreases from 32.8% to 30%, and the proportion of agriculture rises from 21% to 39%. As a net importer of virtual water, the net virtual water imports of Beijing increases from 2.88 billion m^3 to 2.98 billion m^3 which accounts for more than 50% of the final demand. Although agriculture consumes the most virtual water, it mainly relies on inputs from other provinces to meet the needs of Beijing. A comparative analysis of virtual water flows between 8 sectors in 2007 and 2017, it is found that the virtual water flow pattern remains unchanged, agriculture, mining, and water supply are the virtual water output sectors while construction, transportation, and service are the virtual water input sectors. The net output of virtual water from agriculture is 982 million m^3 in 2017, and the flow to manufacturing and service is 640 and 230 million m^3 , respectively. There are obvious outflow-inflow pairs, including agriculture-manufacturing, agriculture-service, manufacturing-construction, manufacturing-service, manufacturing-transportation, and service-construction.

With the advancement of water saving work and the improvement of water use efficiency, the direct water use coefficient of various departments has decreased, and virtual water consumption of Beijing has declined 14% in the past 10 years. The pressure on water resources could be relieved to some extent due to input agriculture and mining with high water consumption and output service industry with low water consumption. In the future, water-saving work in Beijing will not only control the scale of water consumption in agriculture with large direct water use coefficients but also need to pay attention to the implementation of water-saving measures in the transportation, construction, manufacturing, electrical supply, and service industries. At the same time, it's necessary to strengthen the management of water resources at end-users and reduce waste of products.

Key words: virtual water; input-output analysis; virtual water consumption; virtual water trade; water use coefficient; Beijing