

城市化背景下中国虚拟水流动空间 变化特征及其驱动因素研究

杜依杭 王钧[†] 鲁顺子 李婧贤 蔡爱玲

北京大学深圳研究生院城市人居环境科学与技术重点实验室, 北京大学(深圳)未来城市实验室, 北京大学城市规划
与设计学院, 深圳 518055; [†] 通信作者, E-mail: wangjun@pkusz.edu.cn

摘要 为了解决日益增涨的水资源需求导致的缺水问题, 从投入产出视角进行合理的虚拟水调动已成为缓解地区水资源压力的新途径。基于1997年与2010年区域间投入产出表以及水资源公报数据, 构建虚拟水多区域投入产出计算模型, 并细化用水产业, 计算得出区域间虚拟水相互交换关系与转移量。同时, 将区域虚拟水空间流动量与区域间人口迁移和产业转移特征进行关联分析, 结果表明, 研究时段的中国城市化进程中, 虚拟水主要由内陆地区向沿海地区输送, 且区域间人口迁移特征与虚拟水空间转移特征的关联性很强。人口流动带动消费品转移, 进而引起虚拟水流动, 产业空间转移通过生产要素的空间转移与聚集, 持续影响虚拟水的流动量和流动方向。因此, 基于中国城市化特征, 未来区域发展应考虑结合实体水调动以及虚拟水流动与人口迁移和产业转移的关联关系, 保证经济活动密集区域的水资源供给。

关键词 虚拟水空间流动; 投入产出分析; 人口迁移; 产业转移; 中国城市化

Study on Characteristics of Virtual Water Flow Spatial Change and Influencing Factors in China

DU Yihang, WANG Jun[†], LU Shunzi, LI Jingxian, CAI Ailing

Key Laboratory for Human and Environmental Science and Technology, Future Cities Laboratory of Peking University
(Shenzhen), School of Urban Planning and Design, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055;

[†] Corresponding author, E-mail: wangjun@pkusz.edu.cn

Abstract Population migration and aggregation of industrial factories in the process of urbanization in China has further increased water demand in the relatively developed areas of China. The existing water transfer projects couldn't meet the increasing demand for water resources in water-scarce areas. The calculation of virtual water based on the input-output analysis and the implementation of reasonable virtual water transfer have become new approaches to relax the demanding pressure on regional water resources. This analysis used the regional input-output tables of the years 1997 and 2010 and the water resources bulletins of China to build a multi-regional input-output calculation model of virtual water and calculate the exchange relationships and transfer volumes among virtual waters of different industries in detail. This study also analyzed the association of regional virtual water flows with inter-regional population migration and geographic transfers of industries. The results showed that there were highly correlated relationships between the characteristics of regional population migration and virtual water spatial transfer in the context of urbanization in China. The geographic transfers of industries continue to affect the volume and direction of virtual water flows. In the future, researchers should consider the relationship between physical water transfers, virtual water flows, population migration and geographic transfers of industries in the context of urbanization to ensure the supply of water resources in China.

Key words virtual water flows; input-output analysis; population migration; geographical transfers of industries; urbanization in China

国家重点研发计划(2017YFC0505801)、北京大学(深圳)未来城市实验室铁汉科研开放课题基金(201702)和深圳市生态观测研究站项目(SZCG2018161641)资助

收稿日期: 2018-12-22; 修回日期: 2019-05-08

随着中国城市化水平的快速提高,区域间产生大规模的人口迁移与产业转移聚集。在产业转移方面,中国经历传统计划经济体制下产业在内陆地区发展、改革开放时期产业向东部地区转移聚集以及目前产业双向转移的三大阶段^[1]。东部沿海地区对外开放程度较高,工业化体制较完善,吸引较多技术密集型产业聚集。中西部地区资源禀赋优异,劳动力储备充足,聚集较多资源依赖型产业与劳动密集型产业,同时通过西气东输、西电东送等工程缓解东部资源压力。东部与中西部的双转移模式也有利于实现人口与资源的最优配置。东部沿海地区的产业聚集和经济水平提高与该地区人口流动呈正相关关系,并与中西部人口流动呈负相关关系^[2]。在中国人口南多北少的不均衡基础上,经济发达地区有更多就业机会,并对劳动力产生吸引力,人口迁入现象更明显。大量人口迁入与产业经济活动的高度集聚引发诸多资源环境问题(如生态环境失衡与资源枯竭),将直接导致城市发展的不可持续性。近年较为严峻的是产业聚集区水资源消耗量日趋增加,导致人口与经济活动密集区域高度缺水。统计数据表明,中国142个百万级人口的城市2006—2015年用水总量年平均增加约5.7%,而其年度水资源总量同比下降约2.6%,全国2/3的大中城市面临水资源短缺,中国水资源空间分布不均的现状加大了北方地区发生水危机的可能性^[3-4],水资源短缺已成为制约中国城镇发展的最大障碍。如何有效地缓解水资源匮乏,避免全面爆发水危机,已成为当前的热点问题。本研究从虚拟水与实体水调动结合的视角出发,调整地区产业结构,优化贸易网络,以期实现区域水资源优化配置,进而缓解水危机。

虚拟水指生产单位产品所需水量^[5]。目前,研究多采用投入产出法(input-output analysis),将产品贸易量化来反映虚拟水的流动。基于投入产出法的虚拟水核算包括单区域投入产出分析(IOA)、产业水足迹分析和多区域投入产出分析(Multi Regional Input-Output, MRIO)3个层面,其中以单区域为对象的研究较多。例如在国家研究层面,Zhang等^[6]通过计算,发现隐含在中国国内贸易中的虚拟水总量是出口国外贸易的虚拟水总量的2倍。在区域研究尺度上,Dietzenbacher等^[7]应用IOA模型核算西班牙城市安达卢西亚的虚拟水贸易量,发现每年90%的水消费源自农业部门;吴争程^[8]利用投入产出法研究福建省的虚拟水情况,分析福建省经济贸易中的

水调配量。在产业水足迹研究方面,段志刚等^[9]运用投入产出法分析北京市工业虚拟水情况,计算北京市23个工业部门的直接用水系数、地区完全用水系数、地区用水乘数和相对用水系数,并分析各工业部门的用水效率。马超等^[10]的研究表明,中国虚拟水在农产品贸易方面存在较大的逆差,属于农产品虚拟水净进口国,且农业虚拟水净进口量逐年增加。在多区域间投入产出分析方面,目前研究较少,且研究范围较小,主要存在区域间投入产出模型对数据要求较高、编制难度较大等困难。Guan等^[11]使用多区域投入产出表计算中国南北方的虚拟水流动量,指出水资源估价过低,并且未在生产和消费中得到足够的重视。曹涛等^[12]核算京津冀区域间的虚拟水流动关系,给出未来总体三区域协调发展的相关建议。此外,关于城市化与水资源的研究集中于城镇化对水资源消耗量的影响(如鲍超^[13]认为城镇化会间接导致城镇建成区的缺水危机)、城市化与水资源承载力(如宋新山等^[14]分析城市水资源的承载力与可持续发展受城市化进程的影响)以及城镇化与水资源系统的相互关系(如方创琳等^[15]研究西北干旱地区城市化与水资源变化的交互耦合过程)等方面,关于城市化与虚拟水流动之间耦合关系的研究相对较少。

已有的虚拟水方面的研究均基于特定区域、特定产业的投入产出表MRIO进行矩阵运算,得出该区域虚拟水的得失情况。城市化与水资源方面的研究均基于实体水资源消耗,欠缺对城市化对虚拟水流动的总影响以及虚拟水转移驱动因素的分析。虚拟水产生流动的根本原因是城市化进程中人口迁入与产业聚集引起产品消耗,因此,通过分析需求区域的发展格局以及供水区域的产业现状,才能了解我国区域间虚拟水贸易的整体状况,最终发挥虚拟水调动效用最大化。

本研究从城市化背景出发,以1997年和2010年多区域间投入产出表为数据基础进行相关计算,得到区域间虚拟水流动关系。在此基础上,分析中国虚拟水空间转移与城市化过程中人口迁移和产业转移之间的耦合关系。

1 研究方法

1.1 多区域投入产出模型(MRIO 模型)

本文利用1997年与2010年中国区域间投入产出表进行多区域投入产出模型测算。将产业部门合

并后,根据平衡原则进行校验,结果表明总投入仍然与总产出保持相等。最终的投入产出简表如表1所示(底部直接反映区域内各产业的用水量)。

假设研究空间尺度内存在 m 个区域,每个区域内有 n 种产业(区域用 R 表示,产业用 S 表示; $m \leq 30$, $n \leq 3$),则根据区域投入产出活动的平衡关系,存在

$$X^{Ra} = \sum_{b=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij}^{RaRb} + \sum_b^m Y_i^{RaRb} + e_i^{Ra}, \quad (1)$$

其中, X^{Ra} 表示 R 区域内各部门的总产出, X_{ij}^{RaRb} 表示 a 区域 i 部门提供给 b 区域 j 部门的中间产品投入, Y_i^{RaRb} 表示 a 区域 i 部门提供给 b 区域最终需求消费提供的投入量, e_i^{Ra} 为 a 区域的出口量。可用矩阵表示为

$$X^{Ra} = A^{RaRb} + Y^{RaRb} + E^{Ra}, \quad (2)$$

其中, X^{Ra} 表示总产出矩阵, A^{RaRb} 表示直接消耗系数矩阵, Y^{RaRb} 表示最终使用矩阵, E^{Ra} 表示出口矩阵。引入直接消耗系数矩阵概念:

$$A^{RaRb} = [a_{ij}^{RaRb}] = [x_{ij}^{RaRb} / x_j^{Rb}], \quad (3)$$

矩阵元素 a_{ij}^{RaRb} 表示 b 区域 j 产业生产单位产品时, a 地区 i 产业输入的直接投入量。

根据 Leontief 逆矩阵 $[a^{RaRb}] = (I - A^{RaRb})^{-1}$, 将式(2)变形, a^{RaRb} 表示 a 地区给 b 地区生产一单位产品的投入量,得到下式:

$$X^{Ra} = (I - A^{RaRb})^{-1} (Y^{RaRb} + E^{Ra}), \quad (4)$$

简化后得到

$$X = (I - A)^{-1} Y. \quad (5)$$

1.2 产业用水系数计算

在多区域投入产出的经济量值基础上,将经济数据转换成相应的用水相关数据。其中,直接用水系数直接反映各产业部门经济产出的消耗用水量,计算公式为

$$K_j = W_j / X_j, \quad (6)$$

式中, K_j 表示 j 产业的直接用水系数, W_j 表示 j 产业的实际用水数据, X_j 表示 j 产业的总产出。计算 m 个区域内 n 个产业的直接用水系数,即可得出直接用水系数向量:

$$K = K_1, K_2, K_3, \dots, K_{30}. \quad (7)$$

完全用水系数反映某个产业每增加一个单位的产品最终需要的直接和间接水资源量总和,计算公式如下:

$$K' = K(I - A)^{-1}. \quad (8)$$

1.3 区域间虚拟水转移量

将式(7)中直接用水系数向量代入式(5),得到最终的区域虚拟水消费计算公式:

$$V_w = K \times (I - A)^{-1} \times Y, \quad (9)$$

表 1 2010 年中国多区域投入产出简表
Table 1 Multi regional input output table of China in 2010

类别	区域	产业	中间使用								最终使用			出口	总产出
			区域 1				区域 N				区域 1	...	区域 N		
			产业 1	产业 2	...	产业 n	产业 1	产业 2	...	产业 n					
中间投入	1	1	X_{11}^{R1R1}	X_{12}^{R1R1}	...	X_{1n}^{R1R1}	X_{11}^{R1Rn}	X_{12}^{R1Rn}	...	X_{1n}^{R1Rn}	Y_1^{R1R1}	...	Y_1^{R1Rn}	e_1^{R1}	X_1^{R1}
		2	X_{21}^{R1R1}	X_{22}^{R1R1}	...	X_{2n}^{R1R1}	X_{21}^{R1Rn}	X_{22}^{R1Rn}	...	X_{2n}^{R1Rn}	Y_2^{R1R1}	...	Y_2^{R1Rn}	e_2^{R1}	X_2^{R1}
		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
		n	X_{n1}^{R1R1}	X_{n2}^{R1R1}	...	X_{nn}^{R1R1}	X_{n1}^{R1Rn}	X_{n2}^{R1Rn}	...	X_{nn}^{R1Rn}	Y_n^{R1R1}	...	Y_n^{R1Rn}	e_n^{R1}	X_n^{R1}
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
	N	1	X_{11}^{RnR1}	X_{12}^{RnR1}	...	X_{1n}^{RnR1}	X_{11}^{RnRn}	X_{12}^{RnRn}	...	X_{1n}^{RnRn}	Y_1^{RnR1}	...	Y_1^{RnRn}	e_n^{R1}	X_n^{R1}
		2	X_{21}^{RnR1}	X_{22}^{RnR1}	...	X_{2n}^{RnR1}	X_{21}^{RnRn}	X_{22}^{RnRn}	...	X_{2n}^{RnRn}	Y_2^{RnR1}	...	Y_2^{RnRn}	e_n^{R2}	X_n^{R2}
		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
		n	X_{n1}^{RnR1}	X_{n2}^{RnR1}	...	X_{nn}^{RnR1}	X_{n1}^{RnRn}	X_{n2}^{RnRn}	...	X_{nn}^{RnRn}	Y_n^{RnR1}	...	Y_n^{RnRn}	e_n^{Rn}	X_n^{Rn}
	增加值			V_1^{R1}	V_2^{R1}	...	V_n^{R1}	V_n^{R1}	V_n^{R2}	...	V_n^{Rn}				
总投入			X_1^{R1}	X_2^{R1}	...	X_n^{R1}	X_n^{R1}	X_n^{R2}	...	X_n^{Rn}					
用水量			W_1^{R1}	W_2^{R1}	...	W_n^{R1}	W_n^{R1}	W_n^{R2}	...	W_n^{Rn}					

其中, V_w 为完全需水消费矩阵, 表示第 i 行业增加一单位最终需求时需要的直接与间接水资源的总量, 即 i 行业单位产品(以产值万元表示)所含的虚拟水量; K 为直接用水系数行向量; I 为单位矩阵; A 为直接消耗系数矩阵; Y 为最终需求矩阵。

1.4 数据来源

为了精确地探究虚拟水资源流动趋势与城市化进程的双向影响关系, 本文使用的人口数据来自《2010年中国第六次人口普查数据》和《2000年中国第五次人口普查数据》, 区域间投入产出数据选用《1997年中国30个省市区域间投入产出表》和《2010年中国30个省市区域间投入产出表》, 各部门实际直接用水数据来源于《中国水资源公报》以及《中国统计年鉴》, 用水数据根据各省公报用水量 and 谭圣林等^[16]的方法进行统一处理, 以上统计数据均经过后期校准。根据中国投入产出学会课题组^[17]的研究, 结合用水数据及部门属性, 将原有MRIO表中的30个行业数据合并为三大产业, 如表2所示。

2 结果分析

2.1 区域间虚拟水转移特征

根据1997年八大区域(按行政区域划分)与2010年30个区域(除港澳台和西藏自治区外的30个省级行政区)投入产出数据与用水数据计算结果, 可得中国1997年和2010年八大区域虚拟水输入输出量(图1)。对比图1(a)和(b)可知, 1997—2010年中国虚拟水空间流动具有以下特征: 八大区域的总体虚拟水净出口区集中分布在西北、西南和中部; 净入口区集中于北部沿海、东部沿海和南部沿海三大沿海经济发达区域; 流动方向呈现内陆向沿海集中输送的趋势, 具体表现为1997年开始从西北、中部向以东部沿海为核心的三大沿海区域转移, 随着时间推移, 转移强度和集中程度更高; 作为主要的虚拟水转入区域, 三大沿海区域在不同时期有不同的虚拟水输入中心, 其中转移关系主要为从北部沿海和南部沿海向东部沿海转移, 基本转移量均在 $3 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 以上。1997—2010年间, 南部沿海在接受内陆虚拟水流入的同时向中部输出较多虚拟水, 东北地区由虚拟水输入区域逐渐转变成虚拟水输出区域^[18]。

为进一步分析城市化发展对虚拟水流动现状的影响, 将所得计算结果通过网络可视化呈现, 2010年30个省级区域的虚拟水流动状况如图2所示。

表 2 中国投入产出数据部门合并明细表
Table 2 Compilation of 30 sectors in the IO table of China

产业	原投入产出表中 30 部门
第一产业	农林牧渔业
	煤炭开采和洗选业
	石油和天然气开采业
	金属矿采选业
	非金属矿及其他矿采选业
	食品制造及烟草加工业
	纺织业
	纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品业
	木材加工及家具制造业
	造纸印刷及文教体育用品制造业
	石油加工、炼焦及核燃料加工业
	化学工业
第二产业	非金属矿物制品业
	金属冶炼及压延加工业
	金属制品业
	通用、专用设备制造业
	交通运输设备制造业
	电气机械及器材制造业
	通信设备、计算机及其他电子设备制造业
	仪器仪表及文化办公用机械制造业
	其他制造业
	电力、热力的生产和供应业
	燃气及水的生产与供应业
第三产业	建筑业
	交通运输及仓储业
	批发零售业
	住宿餐饮业
	租赁和商业服务业
	研究与试验发展业
	其他服务业

1997—2010年, 虚拟水空间流动趋势更加集中, 且相互转换关系趋于网络化, 空间流动量在15年间显著增加, 1997年中国虚拟水转移总量为 $2.96 \times 10^{11} \text{ m}^3$, 2010年中国虚拟水转移总量增长至 $4.49 \times 10^{11} \text{ m}^3$, 单向转移最大值由1997年中部地区向南部沿海转移的 $7.78 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 到2010年中部地区向东部沿海转移的 $15.37 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。由于以三大都市圈为代表的经济发达区域人口与产业高度密集, 对实体水资源的消耗与虚拟水的消费需求均较高, 需要以新疆自治区和黑龙江省为代表的地区进行劳动力与水资源双重补给。总体上, 在我国城市化背景下, 由西向

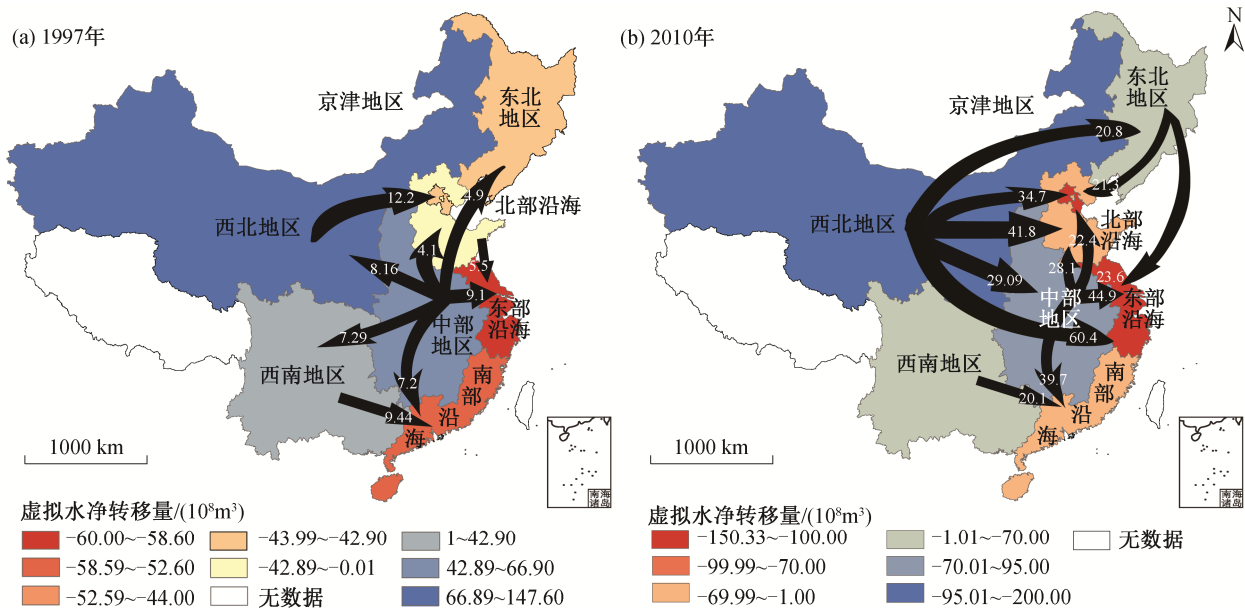


图 1 1997 (a)和 2010 年(b)中国八大区域虚拟水流动示意图
Fig. 1 Virtual water transfer of China's eight regions in 1997 (a) and 2010 (b)

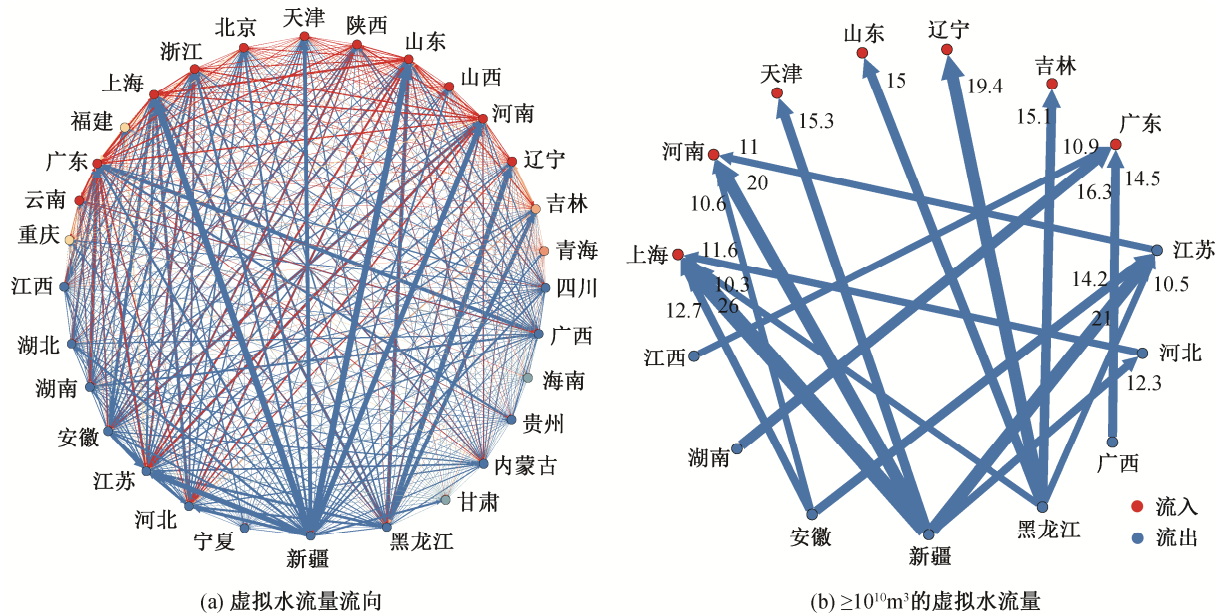


图 2 2010 年中国省级区域间虚拟水置换示意图
Fig. 2 Virtual flow directions and flows between provincial regions of China in 2010

东人口趋于密集, 产业趋于集中, 经济发展水平增高, 同时受水资源南多北少的自然资源约束, 形成现有的虚拟水空间流动格局。

根据计算结果可知, 中国省级区域虚拟水净入口省区为 15 个, 净出口区为 15 个。虚拟水流入量最多的 3 个省份为上海、广东和北京, 其中上海虚拟水流入量高达 $1.01 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。虚拟水流出量最多的 3 个省份为新疆、黑龙江和安徽, 其中新疆虚拟

水流出量高达 $1.98 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。虚拟水流动现状既受城市化过程中人口短距离迁移的影响, 又受限于运输过程中的损耗和资源需求的时间条件, 转移方向整体上呈现出区域中心就近输送的模式。如图 3 所示, 以三大城市群的中心京津地区、上海和广东为代表, 直观地体现出在一定范围内, 经济发达区域将直接从距其最近的资源或产业良好区域获得虚拟水。这里的经济发达与资源良好是范围内相对的两

种角色。如在北部区域内,京津地区在经济发展上占据相对优势,邻近资源状况良好的各省均为其输送虚拟水,距离最近的河北省向北京市转移虚拟水 $5.37 \times 10^8 \text{ m}^3$,向天津市转移虚拟水 $3.99 \times 10^8 \text{ m}^3$,内蒙古自治区向北京和天津各转移虚拟水 3.34×10^8 和 $3.44 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。将北部区域细分,则出现东北地区以靠近环渤海经济带的辽宁省为中心,获得吉林省的虚拟水输送 $6.14 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和黑龙江省的虚拟水输送 $19.44 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。京津地区综合占地面积较小,且近年来北京大力控制人口迁入,对虚拟水的需求基本上可由附近区域的资源满足,趋于和谐发展的状态。

东部沿海地区的江浙沪三省在经济上占相对优势,从距离较近的山东省、安徽省和江西省获得虚拟水。其中,安徽省分别向江浙沪三省转移虚拟水 12.78×10^8 , 8.88×10^8 和 $14.27 \times 10^8 \text{ m}^3$,占安徽省总虚拟水输出的较大比例;在长江三角洲(长三角)三省区域内,上海又以其经济地位从江苏省获得虚拟水 $8.35 \times 10^8 \text{ m}^3$,从浙江省获得虚拟水 $3.63 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。中南部以珠江三角洲(珠三角)为首的沿海经济开放区获得中部地区大量虚拟水支援,如湖北省和湖南省各自向广东省输入 9.03×10^8 和 $16.38 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。同时,由于近年来粤港澳大湾区综合发展势头正猛,广东省的经济在原有基础上进一步发展,对虚拟水的需求与日俱增,周边省区均以不同的形式为其输送虚拟水^[19]。西部地区总体上虚拟水转移量较少。此外,需特别关注辐射全国范围的最主要的虚拟水输出区新疆、内蒙等地为全国输送的虚拟水。未来的虚拟水宏观调配要从经济中心和资源中心两个角度出发,不仅要时刻关注京津冀、长三角和珠三角等经济中心的虚拟水需求,还要重点观测资源输出中心地区的水资源情况,保障其经济发展维持良好的状态。

2.2 虚拟水空间流动与人口迁移关联特征分析

随着经济的快速发展和人口迁移政策的放宽,中国人口迁移逐渐活跃,长三角、珠三角和京津冀三大城市群成为省际人口迁移的主要方向。大量的人口迁入加速城市资源消耗,提高了产品消费量,从而影响虚拟水流动。已有研究表明,人口增加会直接影响虚拟水流动,人口对水资源的影响应从生活方式和生产活动两方面考虑,在人均生活水资源消费水平不变的情况下,人口规模的扩大必然增加水资源需求量,同时通过生产方式间接地影响水资源需求,从而吸引虚拟水流入^[20]。人口在区域虚拟

水贸易中既是生产者又是消费者,人们生产各种产品,并在生产过程中消费一定数量的产品来满足自身需要。较多学者用模型分解法证实,人口效应是虚拟水流动增长的推动因素,且人口的富裕程度对虚拟水的流动方向也有一定的影响。例如,有研究证实,从整体上而言,人口迁移对东、中、西部地区粮食生产虚拟水总量起拉动作用,其中西部地区产品虚拟水受到的拉动作用最明显,并且非常稳定,东、中部地区,尤其是中部地区,在2005—2007年受到的影响波动较大^[21]。基于社会网络分析法的相关研究表明,1995—2010年间中国人口迁移具有以下特征:人口迁移量逐年增大,2005—2010年间全国省级区域人口迁移总量高达10998.78万人,省际间人口迁移的规模也在逐渐增大,其中广东省1995—2000年间人口迁移量高达1193.907万人^[22];流动方向主要是由不发达省份流向发达省份,迁移人口主要分布在中国人口大省之间,由四川、河南和安徽等人口迁出省份指向广东、福建和上海等地;受空间距离、经济发展水平的影响,人口迁移具有一定的中心性,主要由经济落后地区向就近地区的经济中心迁移,这与前文所述虚拟水区域中心就近输送的包围模式基本上一致,可见二者有密切的内在联系。

为详细地探究人口迁移与虚拟水空间流动的关系,将《2000年中国第五次人口普查数据》与《2010年中国第六次人口普查数据》进行处理,结果如图4所示。中国人口迁入区集中于北部沿海、东部沿海和南部沿海三大沿海经济发达区域及东北老工业基地振兴区域,人口迁出区集中于内陆的中部和西部。分析结果发现,中国30个省区人口迁移与虚拟水空间流动呈现相同的中心结构,均从经济落后但资源禀赋较好的内陆区域向经济发达但资源短缺的沿海区域转移。

据文献[23],人口流入省份为17个,人口流出省份为13个;人口流入总量最多的3个省份为广东、浙江和上海,其中广东省人口流入量高达1929.5万人。南部区域,尤其是长三角和珠三角区域的经济发达省份,较多的就业机会对人口产生较强的吸引力。北部区域虽为人口流入区,但其流入量较小,其中东北三省为传统工业区,近年发展迟缓,新疆和内蒙古等资源富集区域地理位置偏僻,人口吸引力总体上趋于减小。人口流出最多的3个省份为河南、四川和安徽,其中人口迁出量最高值为河南省,

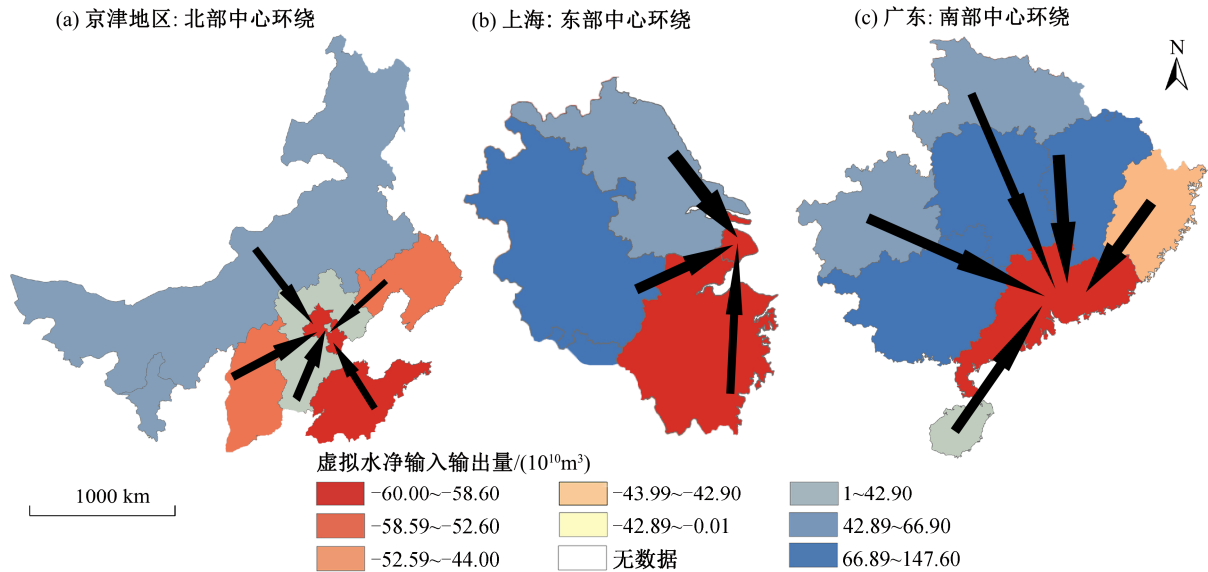


图 3 区域围绕中心模式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the center-surround pattern

流出量为1025.1万人。人口流出区域集中在人口数量大、经济欠发达、就业岗位有限的中部区域,对人口的吸引力不足,引起人口外流。

从人口与资源匹配角度分析,经济发达地区,特别是沿海地区,既是对人口迁移吸引力最强的地区,也是淡水资源相对紧缺地区。人口聚集直接导致人口与资源稀缺的矛盾加剧,表现为人们为提高生活水平而使人均资源消耗增加,人口消费结构的

改变使人均资源消耗增加。从这两方面看,人口的继续增长将直接导致人均占有不可再生资源的急剧减少,进而阻碍城市化的可持续发展^[24]。具体的动力组合表现为“推拉机制”。对于经济发达区域,由于人口迁入带来的产品消费和资源消耗,产生对虚拟水的极大拉力。对于经济欠发达区域,由于当地就业岗位不足和劳动力过剩等消极因素,形成人口迁出地的推力,将当地原有的劳动力资源和产品原

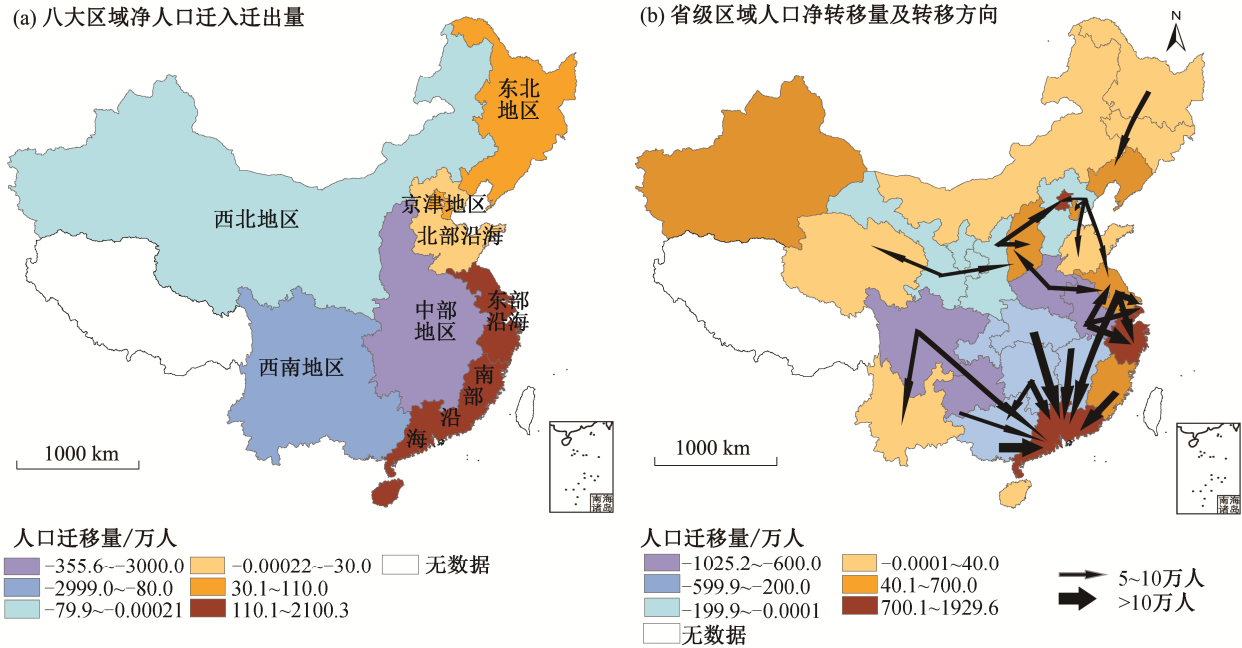


图 4 2010 年中国区域人口迁示意图

Fig. 4 Regional population migration in China in 2010

材料输送到需求过饱和的都市圈,使其利益最大化^[25]。例如,河北、湖北和湖南等自然资源状况良好的区域适度为其周边的经济发达区域提供劳动力和虚拟水,可使双方获利;黑龙江、海南和新疆等区域资源较好,可较大幅度地留住人才,同时还富有余力为用水紧张区域输送虚拟水,则有人口迁入、虚拟水流出的情况。此外,甘肃、宁夏等地资源相对匮乏,人口大量流出,虚拟水也在小部分流出,易产生资源倒置的矛盾,应当引起重视。

2.3 虚拟水空间流动与产业转移关联特征

虚拟水概念的价值还表现在以人口-产业-贸易为纽带的虚拟水贸易上,相关研究表明,通过度量和对两个地区主要产业的虚拟水流动,能够分辨产值与水资源消耗比值高低的产业分类,并在此基础上分析如何调整产业结构布局,以期实现区域水资源的最大化利用^[26]。例如,根据相关研究,在区域产值规模不变的情况下,通过产业结构调整,胡焕庸线以东区域的虚拟水使用量可减少945.24亿吨,胡焕庸线以西区域则减少229.17亿吨,两者合计共节约水资源1174.34亿吨,相当于湖南省2010年全省的水资源总量,可见调整产业结构可以有效地帮助各省市完成用水总量控制目标,同时也成为改善我国水资源分布不均,缓解水资源不足问题的一条重要途径^[27]。为更好地理解产业结构与虚拟水的关系,相关研究中将区域产业结构与虚拟水贸易结构视为原像与镜像的关系,产业结构是客观存在的原像,虚拟水贸易结构是产业结构反映的影像。虚拟水出口是区域产品在满足内部需求后的规模扩大及市场拓展,通过出口贸易反映区域内产业发展状况,是一种正镜像;虚拟水进口是区域内产品由于资源约束等条件,无法满足区域内市场需求,采用进口贸易来引进产品,反映区域内产业的比较劣势,是一种反镜像。产业结构决定虚拟水贸易的结构,虚拟水贸易结构又反映产业结构的状况^[28]。

近年来,经济活动在中国东部沿海地区的高度集聚严重地影响区域内资源承载力,以水资源为代表的生产要素大量消耗,形成资源短缺,引起虚拟水以产品替代的形式流入。同时,在出口贸易不断增加的情况下,东部沿海地区为了满足出口产业原材料的需求,将生产要素的获取延伸到资源丰富的中部和西南区域,中西部区域以不同产业的虚拟水形式,将资源和产品原材料输送到东南沿海,供其经济活动正常运转。因此,近15年来中国产业转移

出现较明显的“向中西”特征^[29-31],第一产业向中西部转移趋势最为明显,第二产业在东部沿海区域的聚集进一步增强,第三产业总体由北向南转移。在上述区域产业转移的背景下,进一步分析中国30个区域虚拟水细分产业的转移方向,可以从资源整合利用的视角进行产业结构优化。

细分产业后,计算得出中国2010年30个区域三大产业的虚拟水转移量,如图5所示。总体上符合就近原则,且呈现“第一产业虚拟水转移过饱和,第二产业虚拟水转移集中,第三产业虚拟水转移不足”的情况。第一产业虚拟水转移量多且区域较分散,东北三省、西南三省以及中部等地区均存在量值较大的农林渔牧业虚拟水转移。在北部,主要是河北省和黑龙江省分别向京津集中输送第一产业虚拟水 7.7×10^8 和 $8.1\times 10^8\text{ m}^3$ 。在中部区域,主要是河南省、山东省和安徽省分别向长三角地区输送第一产业虚拟水 8.48×10^8 , 14.66×10^8 和 $23.3\times 10^8\text{ m}^3$ 。在西南区域,对区位相对较近的广东省以及临近的陕西省,也存在量值较小的第一产业虚拟水输送,如广西、四川和云南分别向广东省输送农林渔牧虚拟水 10.75×10^8 , 3.19×10^8 和 $3.9\times 10^8\text{ m}^3$ 。据《第一财经日报》(<https://www.yicai.com>)统计,中国30个省份中,第一产业增加值占GDP比例超过10%的省份主要分布在中西部区域,山东省以4798.4亿元的产值位列第一,而山东省第一产业虚拟水与位于边疆的新疆虚拟水,分别以高达 5×10^9 和 $2.15\times 10^{10}\text{ m}^3$ 的产值向全国尤其是东部输送。在上述中国产业转移的背景下,东部区域仍在发展出口贸易,但其资源和材料入不敷出,通过中西部地区的第一产业虚拟水输送来替代产品,是非常有效的解决途径。

第二产业虚拟水转移集中在东北和东部沿海区域,且转移量相对于第一产业总体上减少较多。自中国提出振兴东北老工业基地计划以来,东北区域发展趋势尚佳,如黑龙江省向京津冀经济中心输入第二产业虚拟水 $3.13\times 10^8\text{ m}^3$ 。东部沿海主要以江苏省为第二产业中心,就国家发展改革委员会发布的全国区域工业运行数据来看,江苏省居全国首位,同时作为第二产业虚拟水输出中心,为长三角经济区提供第二产业虚拟水高达 $8.91\times 10^8\text{ m}^3$ 。此外,由于东部第二产业发展需求较大,除得到较近的江苏供水外,还得到河南省、湖北省和安徽省输入第二产业虚拟水 8.48×10^8 , 3.64×10^8 和 $9.7\times 10^8\text{ m}^3$,以及轻工业发展较好的福建省输入虚拟水 $3.25\times 10^8\text{ m}^3$ 。

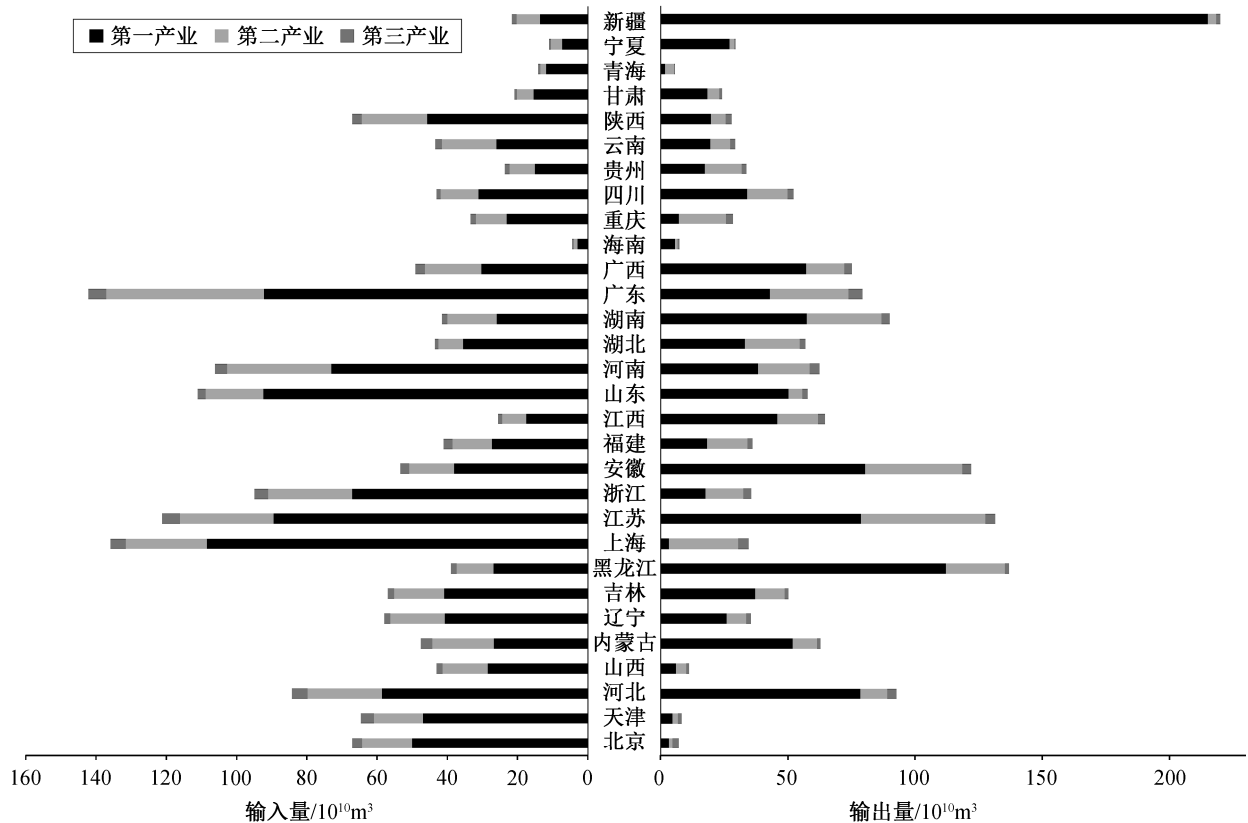


图5 2010年中国30个区域三大产业虚拟水的输入与输出量

Fig. 5 A histogram of virtual water input and output of three industries in 30 regions of China in 2010

第三产业虚拟水转移总量较小,例如福建省向云南省输入第三产业虚拟水 $3.9 \times 10^6 \text{ m}^3$,四川省向重庆市输入第三产业虚拟水 $1.2 \times 10^7 \text{ m}^3$,数量级均较小。主要原因是第三产业产品流动性较小,如海南省的主要支柱产业是旅游业、房地产业等第三产业和热带农业,以产品流动形式向外输出较多的只有热带农产品^[32]。从中国三大产业的虚拟水消费的最终需求占比看,第一产业的最终需求相对较小,而虚拟水消费相对较大,因此集中于中西部地区的第一产业应尽量削减其在国民经济中所占份额,鼓励农业实施虚拟水战略,加大粮食进口;集中在东部地区的工业最终需求相对较大,导致其虚拟水消费量也较大,因此第二产业应是今后节水的重点方向;由于为满足服务业最终的需求,需要相对较少的虚拟水消费,因此在全域尺度内(尤其是资源状况较好的西南区域)发展第三产业,应是今后产业发展的首选。

3 结论与讨论

本文以我国各地区各产业虚拟水流动情况为基

础,从多角度识别急需用水的区域与相关产业,以及能够解决其需求的供水区域产业,为中国水资源危机提供新的解决方案。在已有虚拟水研究成果基础上,进一步提出基于投入产出分析的区域产业虚拟水定量核算模型,计算1997年八大区域,2010年30个区域三大产业虚拟水流动转移量,结合中国城市化背景下人口迁移趋势和产业转移,对计算结果进行分析,得出如下结论。

1) 中国城市化背景下的15年间,区域间虚拟水转移总体上呈现从中西部内陆区域向东部沿海人口与产业密集地区输送的趋势,虚拟水流动方向整体上存在不同尺度范围的区域中心就近输送的包围模式。北部区域主要以京津冀为核心,从周围资源优势较好的东北三省、内蒙古等地区获取虚拟水;华东区域以江浙沪三省为核心,从距离较近的山东省、安徽省和江西省获取虚拟水;中南区域以珠三角为首的沿海经济开放区获得中部区域大量虚拟水支援;西南区域水资源相对丰沛,基本上可以自给自足;西北区域长期干旱少水,需要西南区域进行虚拟水补给,以期缓解缺水现状。此外,还有辐射

全国范围的最主要的虚拟水输出区新疆、黑龙江和内蒙古等地,为整个中国输送大量虚拟水。

2) 中国区域间人口迁移与虚拟水流动有较强的关联性,均呈现围绕中心模式。虚拟水流入省份分布在沿海经济发达区域,流出省份则集中在发展相对落后的内部地区,遵循以经济为目的的短距离迁移原则。虚拟水转移地区与人口流动区域大致吻合,沿海经济带是主要的虚拟水输入地区。但是,受水资源自然禀赋的影响,中国北部以及大部分西南区域均是虚拟水输出区域。总体上,由于迁入人口在东部沿海既产生产品消费,又产生资源消耗,因此产生虚拟水需求,最终形成虚拟水输入。

3) 产业的地理区位转移直接影响虚拟水流动路径,并且,前者对后者有负反馈调节作用。2010年,中国30个区域三大产业虚拟水流动转移总体上符合就近原则,同时呈现“第一产业虚拟水转移过饱和、第二产业虚拟水转移集中、第三产业虚拟水转移不足”的情况。第一产业虚拟水转移量多且区域较分散;第二产业虚拟水转移集中在东北老工业基地和东部沿海区域,相对于第一产业,转移量减少幅度较大;第三产业虚拟水转移总体量值相对较小,主要由其产品流动性较小和新兴行业较多导致。

为解决中国城市化背景下现有的缺水隐患,保持水资源生态安全格局,需要综合考虑人口迁移、产业转移和虚拟水流动之间的关系。同时,由于水资源配置应该是政府、用水主体及市场力量有机结合的动力系统,为优化水资源配置而进行的虚拟水调度,也需要结合各区域原有的自然条件和政府资源政策,保证人口与产业高度集中区域的虚拟水供给,对不同产业产品的虚拟水进行区域调配,从全国视角对水资源贸易进行调控,使水资源消耗格局与国家可持续发展相一致^[33],具体建议如下。

1) 结合中国最新区域协调发展战略,应考虑中国“两横三纵”的最新主体规划发展格局,在满足东部沿海地区资源需求的同时,提升中西部地区的部分城市群,协调全域发展^[34]。伴随交通沿线的相应建设逐步完善,东部地区的传统耗水产业可以向西部转移,在产业转移和发展过程中发挥带动和辐射作用,使东部沿海城市的资源危机得以缓解,并以供需关系带动中部城市的经济发展。资源充足的中部区域发展第一产业,并将其虚拟水输送到京津冀、长三角和珠三角等人口集中、产业密集的经济发达区域;在沿海经济带有限的土地范围内发展效

益较高的第二产业和第三产业。同理,在大力倡导振兴老东北工业基地的背景下,北部城市也可凭借其丰富的矿产资源和森林资源,通过能源行业和制造业向东南部城市输送产品,进行虚拟水补给。此外,还需要特别关注虚拟水大规模输出区域(如新疆、黑龙江等地区)的生态系统平衡,避免在输出虚拟水的同时造成本区域内的空间资源配置失衡。

2) 结合中国实体水资源调度战略,需要考虑目前我国优化水资源配置的重大战略工程——南水北调工程,其解决区域缺水问题的成效显著,如东线和中线工程已缓解京津冀、长三角以及沿途城市群的缺水情况。因此,实体水运送方向与虚拟水流动趋势有一部分相一致,且相关研究显示,中线调水后,各分支的平均流量均变小,表明汉江中下游的可用水资源量减少^[35],在未来的发展中,可考虑用虚拟水流动部分地取代中部城市至东部和北部城市的实体水运输,以期减少其人力与经济消耗。

3) 结合中国产业结构优化战略,一方面应考虑产业结构演进会带动用水量、用水结构、用水效率和效益变化,另一方面,经济结构做出适应性调整,既可以获得同样的收益,同时可以减少生产耗水。因此,在全国范围内尤其是西南区域大力发展高效益低消耗的第三产业,也是未来的主要发展趋势。综上所述,应根据需求,在全国范围内合理地调配区域间虚拟水,促进虚拟水流动网络向高效、节约的方向发展。

参考文献

- [1] 刘红光,李浩华,王云平. 中国产业跨区域转移的总体特征与趋势. 地域研究与开发, 2014, 33(5): 1-5
- [2] 张欣. 产业结构升级、省际人口流动与城市化[D]. 厦门: 厦门大学, 2014
- [3] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报-2010. 北京: 中国水利水电出版社, 2011
- [4] 国家统计局, 环境保护部. 中国环境统计年鉴-2013. 北京: 中国统计出版社, 2013
- [5] Allan J A. Virtual water: a strategic resource global solutions to regional deficits. *Ground Water*, 1998, 36(4): 545-546
- [6] Zhang C, Anadon L D. A multi-regional input-output analysis of domestic virtual water trade and provincial water footprint in China. *Ecological Economics*, 2014, 100: 159-172
- [7] Dietzenbacher E, Velázquez E. Analyzing andalusian

- virtual water trade in an input-output framework. *Regional Studies*, 2007, 41(2): 185–196
- [8] 吴争程. 福建省虚拟水贸易分析. 泉州师范学院学报, 2007, 25(4): 83–87
- [9] 段志刚, 李善同. 北京市结构变化的可计算性一般均衡模型. 数量经济技术经济研究, 2004, 21(12): 86–94
- [10] 马超, 许长新, 田贵良. 中国农产品国际贸易中的虚拟水流动分析. 资源科学, 2011, 33(4): 729–735
- [11] Guan D B, Hubacek K. Assessment of regional trade and virtual water flows in China. *Ecological Economics*, 2007, 61(1): 159–170
- [12] 曹涛, 王赛鸽, 陈彬. 基于多区域投入产出分析的京津冀地区虚拟水核算. 生态学报, 2018, 38(3): 788–799
- [13] 鲍超. 中国城镇化与经济增长及用水变化的时空耦合关系. 地理学报, 2014, 69(12): 1799–1809
- [14] 宋新山, 王朝生, 汪永辉. 我国城市化进程中的水资源环境问题. 科技导报, 2004, 22(2): 29–32
- [15] 方创琳, 乔标. 水资源约束下西北干旱区城市经济发展与城市化阈值. 生态学报, 2005, 25(9): 2413–2422
- [16] 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
- [17] 中国投入产出学会课题组. 国民经济各行业水资源消耗即用水系数的投入产出分析. 统计研究, 2007, 24(3): 20–25
- [18] Ma J, Hoekstra A Y, Wang H, et al. Virtual versus real water transfers within China. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2005, 361: 835–842
- [19] Yang H, Wang L, Abbaspour K C, et al. Virtual water trade: an assessment of water use efficiency in the international food trade. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2006, 10(3): 443–454
- [20] 喜娟. 我国食物虚拟水消费的地域差异分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2018
- [21] 徐欣葛, 宜虎. 中国粮食虚拟水驱动效应与空间联动分析. 水利经济, 2018, 36(6): 31–36
- [22] 刘盛和, 邓羽, 胡章. 中国流动人口地域类型的划分方法及空间分布特征. 地理学报, 2010, 65(10): 1187–1197
- [23] 国家发展和改革委员会地区经济司. 基于城乡统筹视角的国土空间优化模式与政策研究[EB/OL]. (2013–03) [2018–01–19]. http://www.ndrc.gov.cn/zwx/tztg/201303/t20130329_534792.html
- [24] 王建军. 城市化、第三产业发展与消费需求扩张. 经济与管理, 2006, 20(8): 13–16
- [25] Banister J, Bloom D E, Rosenberg L. *Population aging and economic growth in China*. London: Palgrave Macmillan, 2012: 114–149
- [26] 张洁宇, 马超. 虚拟水视角下区域产业结构的优化路径. 水利发展研究, 2016, 16(1): 33–36
- [27] 熊俊. 基于虚拟水资源的我国区域产业结构优化分析[D]. 广州: 暨南大学, 2018
- [28] 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, (12): 2114–2126
- [29] 刘红光, 刘卫东, 刘志高. 区域间产业转移定量测度研究——基于区域间投入产出表分析. 中国工业经济, 2011(6): 79–88
- [30] 樊士德, 姜德波. 劳动力流动、产业转移与区域协调发展——基于文献研究的视角. 产业经济研究, 2014(4): 103–110
- [31] 毛新雅. 人口迁移与中国城市化区域格局——基于长三角、珠三角和京津冀三大城市群的实证分析. 经济研究参考, 2014(57): 45–54
- [32] 李江帆, 曾国军. 中国第三产业内部结构升级趋势分析. 中国工业经济, 2003(3): 34–39
- [33] 都沁军. 第三产业与城市化协调发展的对策研究. 城市发展研究, 2005, 12(5): 72–75
- [34] 朱松丽. 区域发展与主体功能区划的协调性分析及建议. 中国经贸导刊, 2018(26): 44–46
- [35] Zhao Xu, Yang Hong, Yang Zhifeng, et al. Applying the input-output method to account for water footprint and virtual water trade in the Haihe River basin in China. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(23): 9150–9156