

基于MRIO模型的中国省(市)区水足迹 测度及空间转移格局

孙才志¹, 刘淑彬²

(1. 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心, 大连 116029;

2. 辽宁师范大学城市与环境学院, 大连 116029)

摘要: 基于2012年中国31个省(市)区的投入产出表, 建立水资源扩展型的投入产出模型, 测算了中国31个省(市)区的水足迹及水足迹贸易量, 并基于省际贸易分析了省(市)区间空间转移格局。结果显示: (1) 2012年, 中国水足迹总量为4819.3亿 m^3 , 国际贸易净输入水足迹为261.3亿 m^3 , 省际贸易净输出水足迹为801.6亿 m^3 , 省际贸易在全国水足迹贸易中占主导地位。(2) 就省(市)区而言, 河北、黑龙江等19个省(市)区为净输出省份, 北京、天津等12个省(市)区为净输入省份; 分产业来看, 第一产业水足迹净输出757.9亿 m^3 ; 第二产业净输入222.2亿 m^3 ; 第三产业净输出4.6亿 m^3 。(3) 省际间水足迹空间转移具有来源与去向的不一致性, 同时存在省(市)区转移的地理邻近性, 资源丰富省份和经济发达地区转移现象明显。

关键词: MRIO模型; 水足迹; 空间转移; 中国

2015年中国9个省(市)区的人均水资源量低于500 m^3 的极端缺水临界线。全国600多座城市中, 已有400多个城市存在供水不足问题, 其中比较严重的缺水城市达110个, 全国城市缺水总量为60亿 m^3 ^[1], 水资源短缺的矛盾逐步加剧。虚拟水^[2]与水足迹^[3]概念的提出为重新审视水资源提供了崭新的视角^[4]。虚拟水理论揭示了生产产品隐含的用水量, 水足迹是指一个国家、地区或个人以产品或服务等方式消耗的水资源量, 定量核算产品或服务的水足迹, 可直观呈现人类活动与水资源占用之间的内在联系。

近年来, 基于投入产出技术^[5-6]的水足迹研究已成为水资源投入产出分析研究热点^[7], 其优点是对水足迹的核算从产业层面上涵盖了农业、工业、服务业在内的所有行业产品, 并且可系统展现各地区水足迹贸易及流动情况。投入产出模型可分为单区域模型(SRIO)和多区域模型(MRIO)。SRIO可以计算部门完全用水系数进而分析水足迹及虚拟水贸易, 如国内外学者Lenzen等^[8]、Kondo^[9]、Dietzenbacher等^[10]、Wang等^[11]、Yu等^[12]、黄晓荣等^[13]、赵旭等^[14]、蔡振华等^[15]的相关研究, 但该模型仅能反映研究区情况, 无法区分外部虚拟水的来源; MRIO可以反映研究区与其他区域的经济联系, 进而探讨虚拟水的空间流动^[16], 基于该方法, Hatano等^[17]、Lenzen^[18]、Feng等^[19]、Chao等^[20]、李方一等^[21]、王雪妮^[22]、曹涛等^[23]对国家、区域、流域之间虚拟水贸易流动情况进行了分析。由于中国各省(市)区在资源禀赋、经济发展和消费等方面有一定特点, 导致用水情况地域差异大, 且中国各省(市)区贸易的方式、地位与结构不尽相同, 加之不同省(市)区在技

收稿日期: 2018-09-04; 修订日期: 2019-01-10

基金项目: 国家社会科学基金重点项目(16AJY009)

作者简介: 孙才志(1970-), 男, 山东烟台人, 博士, 教授, 主要从事水资源经济与管理研究。

E-mail: suncaizhi@lnnu.edu.cn

术水平和用水效率上存在差异,伴随着省(市)区间经济贸易产品的输入输出过程隐含了大量的虚拟水,因此采用MRIO对中国31省(市)区水足迹进行核算,进而对各省(市)区用水情况及省际水足迹空间转移进行分析,有利于提高现有研究成果的准确性。

鉴于此,本文在2012年各省(市)区投入产出表的基础上,以省(市)区为空间尺度,同时运用水资源扩展型的投入产出表,计算中国31个省(市)区内部、输出、输入水足迹结构,分析中国国际贸易与省际贸易情况,并在省际贸易的基础上分析中国省级层面水足迹贸易转移的特点,有利于我们从多种视角来理解各省(市)区真实水平衡,为加强节水工作的针对性以及合理界定各省(市)区水资源利用提供科学参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 MRIO模型的构建及水足迹的测算

采用MRIO模型可以刻画地区之间的贸易关系,MRIO模型在传统投入产出模型基础上,增加了贸易因素^[24]。本文研究的31省区水足迹的产出与最终消费平衡关系为:

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & \cdots & A_{1,31} \\ A_{2,1} & A_{2,2} & \cdots & A_{2,31} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{31,1} & A_{31,2} & \cdots & A_{31,31} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_{31} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum F_1 \\ \sum F_2 \\ \vdots \\ \sum F_{31} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:等式左边为总产出矩阵,其中元素 X_n 表示 n 省的总产出;等式右边 $(n \times n)$ 矩阵为各省的投入产出关系,其中对角线上元素 A_{ii} 为省区内部部门投入矩阵,非对角线元素 A_{ij} 为各省(市)区之间的部门投入矩阵;等式右边最后一列矩阵为最终使用矩阵,其中元素 F_n 表示 n 省的最终需求。

1.1.1 水足迹的计算方法

(1) 各省(市)区部门的用水系数:

直接用水系数计算公式^[25]为:

$$\sigma = [\sigma_j], \sigma_j = h_j / x_j \quad (2)$$

式中: σ 为直接用水系数矩阵; σ_j 为 j 部门的直接用水系数; h_j 、 x_j 分别代表 j 部门的直接用水量和总产出。

在直接用水系数的计算中,仅考虑了以自然形态投入的水的数量,但实际为满足本地区各部门的生产需要,作为中间投入的本地区其他部门或其他地区部门产品生产也都需要使用水,即间接用水,这一部分用水虽然不发生于该部门,但将其作为该部门生产间接用水,直接用水和间接用水相加即为完全用水^[25],即满足部门最终需求的产品在整个生命周期中单位产出的用水量。计算公式为:

$$\delta = [\delta_j], \delta_j = \sum_j \sigma_j \times (I - A)^{-1} \quad (3)$$

式中: I 是单位矩阵; A 为直接消耗系数矩阵;其中元素 $a_{ij} = x_{ij} / x_j$ 表示 j 部门单位产出对 i 部门产品的中间消耗; x_{ij} 表示 i 部门对 j 部门产品的中间投入; x_j 为 j 部门的总产出; $(I - A)^{-1}$ 为列昂惕夫逆矩阵,表示生产单位最终产品对中间投入部门产品的完全需求;

(2) 水足迹指标计算

根据投入产出表,省(市)区水足迹结构可分为三部分:①满足本地自身需求,在本地生产并在本地消费的内部水足迹。②通过最终产品输出满足其他地区(国家)的最

终需求, 为输出水足迹。③为满足本地需求引致其他地区的用水量, 通过输入其他地区(国家)生产的产品或服务导致的水足迹流入, 为输入水足迹。

$$\text{内部水足迹计算: } W_P = W_P^U, W_P^C, W_P^G, W_P^D = \delta y_u, \delta y_c, \delta y_g, \delta y_d \quad (4)$$

$$\text{输出水足迹: } W_K = W_K^O, W_K^E = \delta w_o, \delta w_e \quad (5)$$

$$\text{输入水足迹: } W_L = W_L^O, W_L^M = \delta w_q, \delta w_m \quad (6)$$

式中: W_P 表示内部水足迹总和; W_P^U 、 W_P^C 、 W_P^G 、 W_P^D 分别表示农村消费、城镇消费、政府消费、投资水足迹; y_u 、 y_c 、 y_g 、 y_d 分别为投入产出表中农村居民消费支出、城镇居民消费支出、政府消费支出、投资列阵; W_K 表示输出水足迹总和; W_K^O 、 W_K^E 分别表示国内省外流出与出口水足迹; w_o 、 w_e 分别为投入产出表中国内省外流出与出口项列阵; W_L 表示输入水足迹总和; W_L^O 、 W_L^M 分别表示国内省外流入与进口水足迹; w_q 、 w_m 分别为投入产出表中国内省外流入与进口项列阵。

(3) 水足迹贸易计算

本文用输出水足迹与输入水足迹的差值来衡量一个地区水足迹的贸易情况^[26]。省(市)区水足迹贸易的表达式为:

$$W_T = (W_K^O - W_L^O), (W_K^E - W_L^M) \quad (7)$$

式中: $(W_K^O - W_L^O)$ 表示省际贸易水足迹净输出量; $(W_K^E - W_L^M)$ 表示国际贸易水足迹净输出量; W_T 为总水足迹贸易值。当 $W_T > 0$ 时, 表示该省水足迹净输出, 本地生产所需水足迹量大于消费的, 说明该省替水足迹输入地消耗了水资源, 有利于缓解其他区域用水压力; 当 $W_T < 0$ 时, 表示该省水足迹净输入, 本地消费所需水足迹量大于生产的, 说明该省通过输入水足迹消耗了水足迹来源地的水资源, 来满足本地对水足迹消费的最终需求, 节省了本地的水资源, 但会加重其他区域用水紧张的局势。

1.1.2 基于省际贸易的水足迹空间转移

由于各省(市)区的投入产出表均为进口竞争型模型, 假设进口产品的使用结构与全国平均水平相同, 进口产品同国内产品一样进入到中间需求和最终需求^[27]。因此, 研究中国基于省际贸易的水足迹空间转移需要对进口产品进行剔除, 本文引入进口系数矩阵 \hat{M} , \hat{M} 是按进口量占国内总需求(包括中间需求和最终需求)比例确定的。

剔除进口后, 各省总产出矩阵可改写为:

$$X^b = [I - (I - \hat{M})A]^{-1} [(I - \hat{M})F] \quad (8)$$

分省区间的水足迹空间转移需要将完全用水系数同各省区的投入产出模型结合, 可通过如下公式计算:

$$Z^{RS} = \delta^R [I - (I - \hat{M})T^{RS}A^R]^{-1} [(I - \hat{M})F^R] \quad (9)$$

式中: δ^R 、 A^R 、 F^R 分别为 R 省(市)区的完全用水系数矩阵、直接消耗系数矩阵、最终需求矩阵; T^{RS} 表示区域间贸易系数矩阵, 指分行业从区域 R 流至区域 S 的流量矩阵, 其计算过程参考文献[28]。

1.2 数据来源

为了保证所用研究数据的时效性和可获得性, 本文数据更新至可获得的最新国家统计局编制的2012年投入产出表。根据《国民经济行业分类》标准将投入产出表中的42部门合并为第一、第二、第三产业。各产业生产用水数据: 第一、第二产业用水量数据均

来自于《中国水资源公报》；第三产业用水量计算参考文献[7]，生活用水由居民用水和公共用水（含第三产业和建筑业等用水）组成，本文采取生活用水减去居民用水的方法得到第三产业用水量，居民生活用水的计算是将各地区居民日均用水量与该地人数相乘，各地区人均城镇和农村日用水量数据可从《中国水资源公报》^[29]中获取，各地区人口数量来自《中国统计年鉴》。

各省（市）区水足迹指标数据：依据投入产出表本地内部最终消费情况可分为农村居民消费支出、城镇居民消费支出、政府消费支出、投资项；本地贸易情况可分为国内省外流入、流出、进口项、出口项，其经济产出值均来自2012年各省投入产出表。区域间贸易系数计算所需数据来源于《中国交通年鉴2013》《全国铁路资料统计汇编》和文献[28]。

需要说明的是：①限于港澳台数据尚未收集，本文研究对象是除港澳台外的中国31个省（市）区。2012年中国省（市）区投入产出表将对外贸易分为四列，包括国内省外流出、流入的省际贸易，还包括进口、出口的国际贸易。②由于部分省（市）区的库存项是为了平衡投入产出表中的行向项所处理的，不能完全反映真实库存，因此水足迹计算结果不包括沉淀在库存里的用水量^[27]。③由于建筑业和服务业生产的可以自由流动的产品与工农业产品相比较少^[22]，因此基于省际贸易分析的水足迹空间转移中不包括建筑业和服务业部门。

2 结果分析

2.1 中国31省(市)区水足迹总体状况

根据式(4)~式(6)测算了2012年中国31个省（市）区的水足迹量（表1）。采用“自下而上”法估算地区水足迹主要与具体产品的单位虚拟水含量有密切关系，而基于投入产出法核算水足迹主要与部门的用水系数有关，所以采用两种方法计算的水足迹存在差异。但本文研究结果与目前现有的采用“自上而下”法的研究结果相近^[30-32]。

表2中将各省水足迹分为内部水足迹、输出水足迹、输入水足迹三类。从内部水足迹来看，水足迹总和最大的是广东，为378.4亿 m^3 ，其次是新疆、江苏、湖南、湖北、黑龙江、广西等；而西藏、海南、青海水足迹总和较低，分别为36.7亿 m^3 、37.6亿 m^3 、51.0亿 m^3 。总体来说，水足迹总和大的省份大多数是经济规模较大的省份，如广东、江苏、湖南、湖北等；另一类则是新疆、黑龙江等经济规模相对偏小、水资源利用效率不高、用水强度较大的省区。水足迹总和较小的省份里，大多是经济规模小、产业化程度较低、且水资源总用水量较少的省区，如青海、西藏、海南。

从水足迹贸易值来看，输出水足迹较高的省份有新疆、黑龙江、江苏、北京等，说明输出贸易在这些省市中占了重要位置；输入水足迹较高的省市有北京、上海、广东、江苏等；青海、西藏两省区输出、输入水足迹均较低。大部分省区的国内省外流入、流出水足迹值大于国际进出口水足迹，可以看出水足迹省际贸易在对外贸易中占主导地位，主要与中国近年来各省的贸易联系不断加强、国内市场一体化程度不断加深有重要关系。水足迹国际贸易中，广东、江苏、上海、福建、浙江出口水足迹量较大，广东、北京、上海、江苏进口水足迹量较大。北京作为中国的政治文化交流中心，结合自身市场的优势和强大的国际知名度，对外贸易的活力高，造成其水足迹国际贸易现象显著。

表1 中国31个省（市）区水足迹核算结果
Table 1 Results of water footprint in 31 provinces of China (亿m³)

省(市)区	内部水足迹					输出水足迹			输入水足迹		
	农村消费	城镇消费	政府消费	投资	总和	国内省外流出	出口	总和	国内省外流入	进口	总和
北京	2.3	38.3	4.0	25.8	70.4	350.5	22.6	373.1	260.5	176.4	436.9
天津	2.8	25.9	2.2	25.9	56.8	29.5	11.1	40.5	85.5	23.9	109.4
河北	23.0	56.4	8.4	90.6	178.4	172.7	9.3	182.0	119.8	12.6	132.4
山西	21.3	40.9	3.1	39.0	104.2	24.4	2.0	26.4	36.8	2.4	39.2
内蒙古	8.1	21.0	16.7	46.0	91.8	75.2	—	75.2	142.4	—	142.4
辽宁	11.7	51.1	6.4	69.4	138.6	85.2	17.8	103.0	100.3	20.7	121.0
吉林	11.2	18.9	5.2	79.3	114.6	77.8	4.3	82.1	69.6	13.0	82.6
黑龙江	23.0	78.9	13.0	106.8	221.7	386.7	18.6	405.3	235.7	45.2	280.9
上海	6.6	119.6	6.8	36.2	169.2	152.0	84.5	236.5	213.4	124.1	337.5
江苏	36.6	79.8	25.0	103.0	244.4	270.3	113.3	383.6	193.2	117.3	310.4
浙江	17.3	98.7	6.2	72.0	194.3	84.7	57.9	142.5	156.6	33.7	190.2
安徽	20.8	48.8	7.0	62.5	139.1	251.0	12.8	263.7	196.1	8.3	204.4
福建	23.3	68.3	9.9	93.8	195.3	59.3	63.9	123.1	46.8	62.0	108.8
江西	41.4	65.1	8.2	62.7	177.4	131.5	10.5	142.1	86.5	5.5	92.0
山东	16.6	43.4	11.8	74.3	146.1	23.2	30.6	53.8	61.0	58.3	119.3
河南	22.6	35.3	11.2	58.6	127.7	105.5	5.8	111.3	96.6	7.1	103.8
湖北	23.6	49.5	9.5	146.8	229.4	—	53.7	53.7	—	40.4	40.4
湖南	44.5	94.8	10.3	94.8	244.3	189.7	4.9	194.6	106.7	4.5	111.3
广东	54.7	228.6	15.4	79.8	378.4	84.4	153.9	238.4	156.7	173.7	330.3
广西	41.8	72.8	12.1	84.2	210.8	174.1	12.3	186.4	77.8	46.2	124.1
海南	4.9	13.6	1.3	17.7	37.6	91.2	2.3	93.5	61.3	7.6	68.8
重庆	8.8	32.6	3.6	54.5	99.5	98.2	0.9	99.1	97.3	1.0	98.3
四川	42.5	68.0	9.2	68.6	188.3	24.5	12.1	36.6	38.5	6.7	45.2
贵州	32.3	30.0	6.3	38.6	107.2	61.4	4.8	66.2	60.8	1.8	62.6
云南	54.6	59.4	4.5	64.7	183.1	80.3	9.0	89.3	70.8	16.3	87.2
西藏	8.9	7.7	1.4	18.8	36.7	1.7	3.3	5.0	14.1	0.1	14.2
陕西	11.3	36.6	7.2	75.7	130.8	171.0	30.5	201.5	139.0	20.9	159.9
甘肃	28.3	35.6	13.4	45.0	122.3	129.9	4.3	134.2	74.5	7.1	81.6
青海	4.0	11.7	6.8	28.5	51.0	—	16.3	16.3	—	15.1	15.1
宁夏	18.0	44.2	4.5	22.0	88.6	53.3	7.3	60.6	57.4	0.9	58.4
新疆	65.5	152.4	11.9	111.1	340.9	571.3	29.6	600.8	153.0	18.3	171.3

注：2012年省区投入产出表中内蒙古进出口、湖北和青海的省外流入和流出指标值均为0，表中用“—”表示。

除北京外，其余省份均位于中国沿海地区，其进出口水足迹量大主要是由于优越的地理位置和对外经济贸易发达。

2.2 中国31省(市)区水足迹结构分解

2.2.1 中国内部水足迹结构

在水足迹测算基础上整理得出中国31个省（市）区内部消费水足迹的比例构成

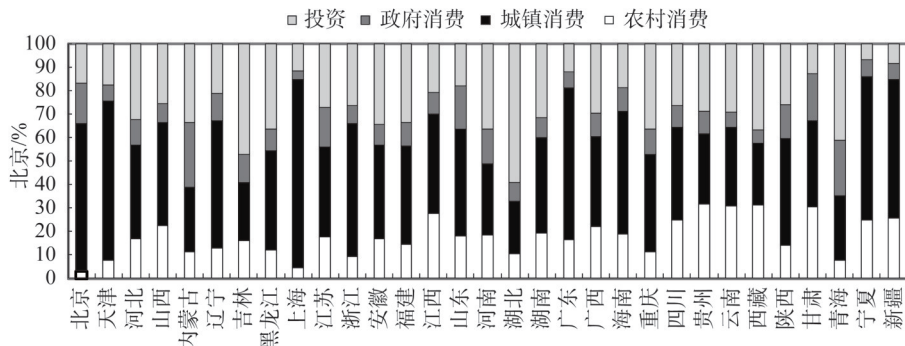


图1 2012年中国31个省（市）区内部消费水足迹比例构成

Fig. 1 Internal consumption water footprint in 31 provinces of China in 2012

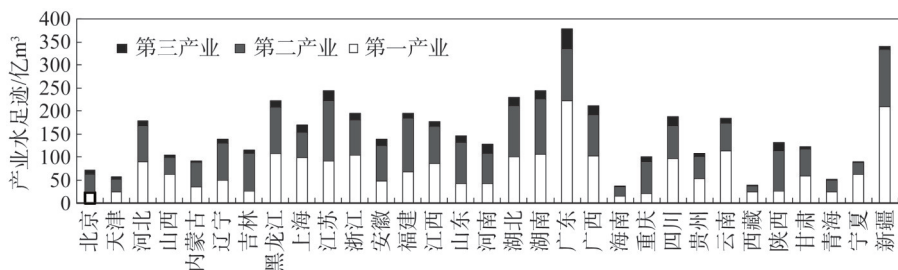


图2 2012年中国31个省（市）区内部产业水足迹构成

Fig. 2 Internal industrial water footprint in 31 provinces of China in 2012

(图1)和内部产业水足迹构成(图2)。从中国31个省(市)区内部水足迹消费比例构成中可得,农村居民消费水足迹在贵州、云南、西藏、甘肃4省区内部水足迹中占比份额相对较大均达到23%以上,主要由于这些省区农村人口规模较大;北京、上海、天津农村居民消费水足迹占比份额较低,分别仅有3.2%、3.9%、4.9%,主要是这些省(市)区经济发达,农村人口比例较低。城镇居民消费水足迹在大部分省份内部水足迹中占比较高,上海、北京、浙江、广东4省市占比份额均达到50%以上,4省市均为城市化水平较高地区。政府消费在大部分省份内部水足迹中占比均最少,这是因为政府消费除在第一产业中占有少部分份额外,在用水强度较小的第三产业消费中占据主导地位,没有与工业相关部门的水资源消耗。投资水足迹在湖北、吉林两省内部水足迹中占比分别达到60%,两省均是矿产资源较为丰富的省份,在满足自身经济发展需要的基础上,还可大量外供,投资潜力大。

分产业来看(图2),第一、第二产业水足迹在各省(市)区中占份额较大,第三产业占很少份额。分省份来看,第一产业水足迹较高的省区有广东、新疆,分别为222.5亿 m^3 、209.2亿 m^3 ,广东农业规模竞争力大,农业经济总量大;新疆主要是第一产业用水效率低、用水系数偏高造成的。第二产业水足迹较大的省区有江苏、新疆,分别为131.3亿 m^3 、123.2亿 m^3 ,江苏经济规模较大、产业化程度较高;第三产业水足迹最高省份为广东,为43.0亿 m^3 ,该省作为中国的旅游大省,经济发达、人口密集,促使其第三产业水足迹最高。第一产业水足迹最低省份为海南,为14.9亿 m^3 ,该省主要由于农业基础较弱,农业经济规模较小导致的;西藏的第二、第三产业水足迹均最低,分别为12.6

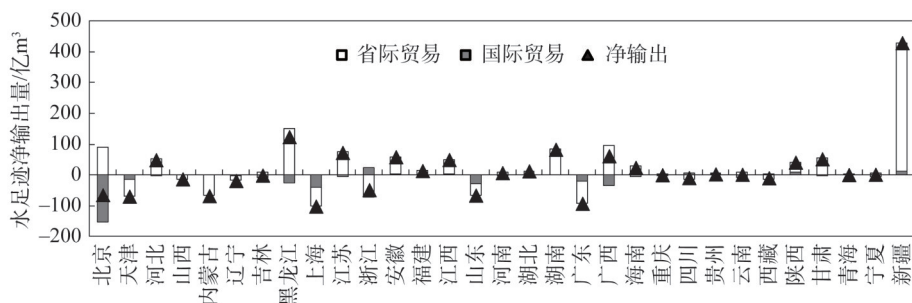


图3 2012年中国31个省(市)区水足迹贸易构成

Fig. 3 Water footprint trade in 31 provinces of China in 2012

亿 m^3 、0.6亿 m^3 ,这主要与该区自身经济规模较小有关。

2.2.2 中国贸易水足迹结构

据式(9)得31个省(市)区水足迹贸易情况(图3),为分析各产业水足迹贸易,将各省(市)区三大产业输出水足迹减去输入水足迹,得到中国31个省(市)区三大产业净输出量(图4)。

中国省(市)区水足迹总体上呈现净输出状态,净输出水足迹540.4亿 m^3 ,其中通过国际贸易净输入水足迹261.3亿 m^3 ,通过省际贸易净输出水足迹801.6亿 m^3 。这说明满足中国31个省区居民最终消费需求对国际贸易有一定的依存度,而省际水足迹贸易值是国际水足迹贸易值的3.5倍,省际贸易在中国水足迹贸易中占主导地位。

分省区来看(图3),水足迹贸易净输入的省(市)区主要有北京、天津、山西、内蒙古、辽宁、吉林、上海、浙江、山东、广东、四川、西藏12个,这些省(市)区本地消费所需水足迹量大于生产的,输入水足迹消耗了水足迹来源地的水资源,节省了本地的水资源,但会加重其他区域的用水紧张局势。满足这些地区生产生活的最终需求会增加其他地区的水资源用水压力。水足迹净输入量较大省市有上海、广东、天津,分别为100.9亿 m^3 、92.0亿 m^3 、68.9亿 m^3 。就上海而言,净输入水足迹最大,主要是第一产业净输入现象明显,究其原因,该市农业播种总面积有所下降,由于经济高速发展、人口规模扩大和居民生活水平的不断提高导致本地生产资源远不能满足当地生产生活需要,在输入大量产品和服务满足当地人最终需求的同时也流入了大量的水资源。对于水资源禀赋条件差的北京、天津、上海、山西等地区,通过水足迹贸易有利于减缓本地的水资源紧张状况,而作为水资源富余的浙江、广东、四川、西藏等地区,输入大量的产品虽

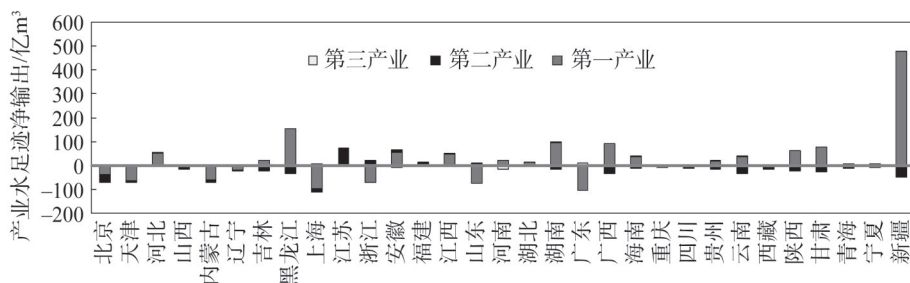


图4 2012年中国31个省(市)区三大产业水足迹贸易量

Fig. 4 Water footprint trade of the three major industries in 31 provinces of China in 2012

然满足了本地区的最终消费,但从节约水资源角度来说却是加重了整体水资源的匮乏。

水足迹贸易净输出的省区主要有河北、黑龙江、江苏、安徽、福建、江西、河南、湖南、湖北、广西、海南、重庆、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆19个,在满足本地自身消费与发展的同时也缓解了其他地区的用水压力。新疆、黑龙江水足迹净输出量较大,分别净输出429.5亿 m^3 、124.4亿 m^3 。对新疆来说,水足迹净输出量最大,与该省区高用水农业为主的产业结构有密切关联,节水技术水平不高,造成生产单位产品的用水量较高,而居民消费水平有限,造成其水足迹净输出现象显著。对于水资源总量丰富的江西、福建、湖南、湖北等省,通过省际贸易为中国其他缺水省份输出了大量水资源;作为中国重要的能源资源产地如河北、黑龙江、安徽等,这些省份在输出大量产品时导致水资源流出,通过贸易输出大量水资源的态势势必会加大这些地区未来的用水压力。

从三大产业水足迹贸易图中得知(图4),第一产业水足迹呈净输出状态,输出757.9亿 m^3 ,主要因为第一产业多为水资源密集型产品,导致其水足迹贸易现象显著,其中黑龙江、湖南、广西、新疆净输出现象显著,而上海、山东、广东净输入现象显著;第二产业水足迹为净输入,输入222.2亿 m^3 ,其中新疆净输入量最大为44.4亿 m^3 ,而江苏净输出量最大为71.2亿 m^3 ;第三产业由于低耗水且产品流动性差的产业特性,水足迹贸易量最小,净输出为4.6亿 m^3 ,其中河南净输入量最大为8.9亿 m^3 ,而输出最明显的广东为7.8亿 m^3 。各省(市)区产业水足迹贸易结构主要受地区产业结构、对外贸易结构、国家政策和经济发展水平等因素的影响。北京第一、第二产业为水足迹净流入,第三产业为水足迹净流出,这与首都特定的政治文化地位是分不开的,第三产业通过提供服务向其他地区输水,但其流出规模小于第一、第二产业的流入规模。山东是中国农业大省,2010年以前,农产品贸易都处于顺差状态,但是从2011年起农产品贸易出现了贸易逆差,致使2012年山东省第一产业为净流入,贸易结构的改变,最终致使山东省整体呈现水足迹净流入。山西是中国重要的能源产地,但产业结构较为单一,尤其第二产业依赖煤炭这一支柱产业,随着中部崛起战略的实施,该省抓住契机进行产业升级,许多消费品及原料需要从别的省区调入,第一、第二产业均有小规模调入现象,造成该省为水足迹净调入。西藏是经济欠发达地区,产业结构不完整,许多消费品需要依赖从其他省区输入来满足,但又由于较小的人口密度,致使该地区有小规模的水足迹净流入现象。

2.3 中国31省(市)区间水足迹的空间转移

由前文可知,中国省际水足迹贸易在对外贸易中占主导地位。为了分析省际水足迹贸易调入、调出量的具体省(市)区转移情况,依据MRIO模型绘制了2012年中国省(市)区水足迹贸易流向关系和弦图(图5),分别以不同颜色代表31个省级行政区,关系带以水足迹流量的大小权衡并对应相应的资源转移地区。需要说明的是,

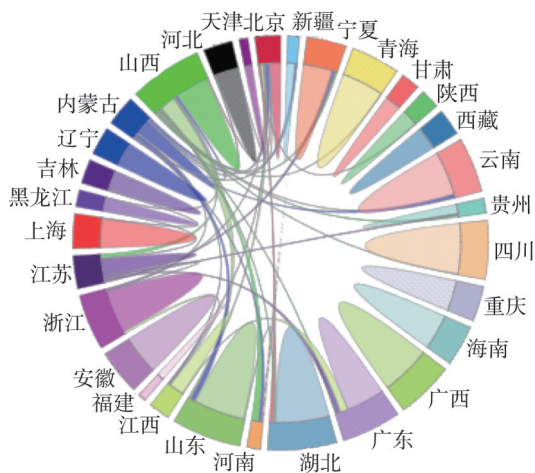


图5 2012年中国31个省(市)区间水足迹贸易流向关系

Fig. 5 Water footprint flow among provinces of China in 2012

为了能更清楚地分析省(市)区间贸易流动方向特征,该图仅表示了各地区调动大于1亿 m^3 的转移流向关系。

从中国水足迹贸易流向关系中可知,①省内水足迹贸易流动在总流动中占有很大的份额。这主要是因为贸易中会出现本地偏好的现象,省级水平上,内部贸易平均为省(市)区贸易的3~4倍,企业更倾向于和本地企业进行贸易往来。其中山东和河南省内水足迹贸易显著是由于两省人口规模偏大,企业产品大部分满足本省内部需求;湖北和四川省内水足迹贸易值显著主要是身居内陆、经济外向程度低的缘故。②大规模的水足迹转移(10亿 m^3 以上)发生在山西向山东、安徽向山东、湖北向内蒙古、宁夏向新疆的调出;中等规模的水足迹转移(5亿~10亿 m^3)主要发生在北京向内蒙古、山东的调入;河北来自山西的调入;内蒙古向北京、山东的调出;内蒙古来自辽宁的调入;吉林向北京的调出;黑龙江向内蒙古的调出;上海向北京、内蒙古的调出;江苏向北京、河北的调出;内蒙古来自山东的调入;河南向山西、山东的调出;北京来自湖北的调入;内蒙古来自贵州的调入;云南向内蒙古、浙江、江西的调出;新疆来自西藏的调入。归纳起来,主要是北京、上海、江苏等发达省市与周边省市之间的转移;内蒙古、河南、山西等中部省区等与周边省区之间的转移。

综合分析中国省(市)区水足迹流动方向可以得出:①水足迹流动过程中来源与去向具有不一致性,如北京水足迹的主要去向地区为内蒙古、山东、湖北这三个省区,而北京水足迹的主要来源地是江苏、吉林、湖北三省份。②位置相邻的省市之间存在大量的水足迹转移现象,如北京与天津、河南与山西水足迹转移量较大,省份之间距离近,产品或原料转移方便,相应的运输成本较低,在促进了省(市)区间贸易发展的同时也使得距离相近的省份之间水足迹转移现象显著。王庆喜等^[33]在研究中也印证了此观点,可以看出距离因素对省区间水足迹转移有较大影响。③产业结构互补性强的省市水足迹转移较显著,如北京的第三产业发达并在国民经济中占有重要地位,但第一、二产业相对薄弱,为支撑其经济发展,大部分产品及原料依赖进口,导致其在水足迹转移的去向地中占比较高;再如广东省,第二、三产业经济实力雄厚,综合竞争力较强,向省外调出的产业产品比例较高,导致其在水足迹转移的来源地区中占比较大。本文研究的基于省(市)区贸易的水足迹流动现象与赵永亮^[34]的有关结论相符合。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1)从各省(市)区水足迹总和来看:各省(市)区之间水足迹存在显著差异。水足迹总和较大的省份主要有两类,一类是经济规模较大的省份如广东、江苏等,另一类是水资源利用效率较低且经济规模相对偏小的省区如新疆、黑龙江等;水足迹总和较小的省区里,大多是经济发展水平有限或水资源总用水量较少的省区如青海、西藏等。

(2)从内部消费水足迹构成来看:农村与城镇居民消费水足迹占53%的份额,政府消费水足迹占6%,投资水足迹占41%,说明满足农村与城镇居民的最终需求诱发的水足迹额最大;从水足迹贸易值来看,通过国际贸易净输入水足迹261.3亿 m^3 ,通过省际贸易净输出水足迹801.6亿 m^3 ,省际贸易在中国水足迹贸易中占主导地位,进出口贸易所占份额有限。

(3) 从各省(市)区水足迹贸易流动来看:水足迹总贸易净输出的省份主要有河北、黑龙江等19个,这些省区生产所需水足迹量大于消费的,通过输出水足迹有利于缓解其他区域用水压力;净输入的省市主要有北京、天津等12个,满足这些地区生产生活的最终需求会增加其他地区的水资源用水压力。

(4) 省际间水足迹的空间转移主要呈现三个特征:水足迹来源与去向省份的不对称性;受地理距离的影响导致位置相邻省份之间水资源转移现象显著;经济发达和资源丰富的省份对水足迹转移具有积极影响作用。

3.2 建议

(1) 倡导各地区建立科学合理的节水型产业结构,完善不合理的区域贸易结构。对于贫水省区,今后应提高节水技术,多出口高效益低耗水产品,同时进口本地没有足够水资源生产的产品(如农产品、纺织品、木材及家具等),通过贸易的形式缓解地区水资源短缺问题;另一方面,水量丰富省区应该在不影响地区经济发展的前提下,适当扩大富水产品的生产,减少对于农产品等水密集型产品的外部需求,当作为调入地时应该给与对应调出地技术支持,有利于全国层面的水资源科学利用^[35]。

(2) 在面对水资源短缺问题上,各个省区要面对“生产者”与“消费者”的双重责任。进口地区通过进口大量产品,弥补了本国资源的不足,促进了本地居民生活质量的提高,而出口地区却消耗了本国的资源和劳动。如果仅由出口地区(生产者)承担减少水资源用水量的责任,就难以体现下游产业和消费端的用水责任,但若仅仅由进口地区(消费者)负责,生产者可能不会主动减少用水量。各省区作为调出地有义务主动减少自身用水量,同时也要刺激调入地选择水资源利用效率更高的调出地。

(3) 应关注全行业的水足迹评价与管理。工业产品中的虚拟水贸易约占全球产品总贸易量的10%^[36],其虚拟水贸易相对较小,但工业生产过程中的工艺、技术、管理等受人为控制程度更强,水资源节约和污染削减的潜力巨大,对缓解水资源短缺具有巨大潜力。今后研究中要关注全行业的用水特征及虚拟水流动研究,对于全面调控和优化水资源利用具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] 孙才志,刘淑彬.中国膳食水足迹区域差异及驱动因素分析.人民黄河,2017,39(9):39-45,50. [SUN C Z, LIU S B. The impacts of driving factors and the regional difference of dietary water footprint in China. Yellow River, 2017, 39(9): 39-45, 50.]
- [2] ALLAN J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible. Priorities for Water Resources Allocation and Management.//London: ODA, 1993.
- [3] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y. Water footprints of nations.//Delft, the Netherlands: Value of Water Research Report Series: No.16. IHE, 2004.
- [4] 程国栋.虚拟水:中国水资源安全战略的新思路.中国科学院院刊,2003,18(4):260-265. [CHENG G D. Virtual water: A strategic instrument to achieve water security. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2003, 18(4): 260-265.]
- [5] DOBOS I, TALLOS P. A dynamic input-output model with renewable resource. Central European Journal of Operations Research, 2013, 21(2): 295-305.
- [6] HARGREAVES J J, HOBBS C F. Metamodeling of input-output relationships for complex power market models. Energy Systems, 2013, 4(1): 25-45.
- [7] 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.]
- [8] LENZEN M, FORAN B. An input-output analysis of Australian water usage. Water Policy, 2001, 3(4): 321-340.
- [9] KONDO K. Economic analysis of water resources in Japan: Using factor decomposition analysis based on input-output

- tables. *Environmental Economics & Policy Studies*, 2005, 7(2): 109-129.
- [10] DIETZENBACHER E, VELAZQUEZ E. Analysing Andalusian virtual water trade in an input-output framework. *Regional Studies*, 2007, 41(2): 185-196.
- [11] WANG H R, WANG Y. An input-output analysis of virtual water uses of the three economic sectors in Beijing. *Water International*, 2009, 34: 451-467.
- [12] YU Y, HUBACEK K, FENG K, et al. Assessing regional and global water footprints for the UK. *Ecological Economics*, 2010, 69(5): 1140-1147.
- [13] 黄晓荣, 裴源生, 梁川. 宁夏虚拟水贸易计算的投入产出方法. *水科学进展*, 2005, 16(4): 564-568. [HUANG X R, PEI Y S, LIANG C. Input-output method for calculating the virtual water trading in Ningxia. *Advances in Water Science*, 2005, 16(4): 564-568.]
- [14] 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.]
- [15] 蔡振华, 沈来新, 刘俊国, 等. 基于投入产出方法的甘肃省水足迹及虚拟水贸易研究. *生态学报*, 2012, 32(20): 6481-6488. [CAI Z H, SHEN L X, LIU J G, et al. Applying input-output analysis method for calculation of water footprint and virtual water trade in Gansu province. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(20): 6481-6488.]
- [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. [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.]
- [17] HATANO T, OKUDA T. Virtual water analysis on the Yellow River Basin using multi-regional I-O tables. Paper presented at 15th International Conference on Input-Output Techniques, 2005, Beijing, China.
- [18] LENZEN M. Understanding virtual water flows: A multiregion input-output case study of Victoria. *Water Resources Research*, 2009, 45(9): 416-426.
- [19] FENG K S, SIU Y L, GUAN D, et al. Assessing regional virtual water flows and water footprints in the Yellow River Basin, China: A consumption based approach. *Applied Geography*, 2012, 32: 691-701.
- [20] CHAO Z, 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.
- [21] 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. *资源科学*, 2012, 34(5): 802-810. [LI F Y, LIU W D, LIU H G. Inter-regional virtual water trade model and its application in Shanxi province. *Resources Science*, 2012, 34(5): 802-810.]
- [22] 王雪妮. 基于区域间投入产出模型的中国虚拟水贸易格局及趋势研究. *管理评论*, 2014, 26(7): 46-54. [WANG X N. Research on distribution and tendency of virtual water trade in China based on inter-regional input-output model. *Management Review*, 2014, 26(7): 46-54.]
- [23] 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. [CAO T, WANG S G, CHEN B. Virtual water analysis for Beijing-Tianjin-Hebei region based on multiregional input-output model. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 788-799.]
- [24] 李晨, 丛睿, 邵桂兰. 基于MRIO模型与LMDI方法的中国水产品贸易隐含碳排放转移研究. *资源科学*, 2018, 40(5): 1063-1072. [LI C, CONG R, SHAO G L. Embodied carbon emissions transfer in China aquatic product trade based on MRIO modeling and LMDI methods. *Resources Science*, 2018, 40(5): 1063-1072.]
- [25] 许健, 陈锡康, 杨翠红. 完全用水系数及增加值用水系数的计算方法. *水利水电科技进展*, 2003, (2): 17-20, 69. [XU J, CHEN X K, YANG C H. Calculating method for total water input coefficient and water input coefficient for added value. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2003, (2): 17-20, 69.]
- [26] 刘冠飞. 基于投入产出模型的天津市虚拟水贸易分析. 天津: 天津大学, 2009. [LIU G F. The analysis of Tianjin's virtual water trade based on input-output model. Tianjin: Tianjin University, 2009.]
- [27] 石敏俊, 王妍, 张卓颖, 等. 中国各省区碳足迹与碳排放空间转移. *地理学报*, 2012, 67(10): 1327-1338. [SHI M J, WANG Y, ZHANG Z Y, et al. Regional carbon footprint and interregional transfer of carbon emissions in China. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(10): 1327-1338.]
- [28] OKUDA T, HATANO T, QI S. An estimation of a multi-regional input-output table in China and the analysis. <http://www.iioa.org/pdf/Intermediate-2004/399>, 2014-01-15.
- [29] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报 2012. 北京: 中国水利水电出版社, 2013. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. *Chinese Water Resources Bulletin 2012*. Beijing: China Water Power Press, 2013.]
- [30] 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): 1-10. [LIU Y T, WANG S G, CHEN B. Virtual water analysis for Beijing based on input-output model. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(6): 1-10.]

- [31] 李凤丽, 曲士松, 王维平, 等. 1997-2012年山东省虚拟水贸易变化及典型区生态环境响应. 灌溉排水学报, 2018, 37(2): 123-128. [LI F L, QU S S, WANG W P, et al. Changes of virtual water trade of Shandong province in 1997-2012 and the ecological environment response of typical areas. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(2): 123-128.]
- [32] 许爽爽, 马树才, 付云鹏. 基于投入产出法的辽宁省水足迹和虚拟水核算. 沈阳师范大学学报: 自然科学版, 2018, 36(1): 58-62. [XU S S, MA S C, FU Y P. Calculation of water footprint and virtual water in Liaoning province with input-output analysis model. Journal of Shenyang Normal University: Natural Science Edition, 2018, 36(1): 58-62.]
- [33] 王庆喜, 徐维祥. 多维距离下中国省际贸易空间面板互动模型分析. 中国工业经济, 2014, (3): 31-43. [WANG Q X, XU W X. A research on Chinese inter-provincial trade based on spatial panel interaction model under multi-dimensional distances. China Industrial Economics, 2014, (3): 31-43.]
- [34] 赵永亮. 国内贸易的壁垒因素与边界效应: 自然分割和政策壁垒. 南方经济, 2012, (3): 13-22, 36. [ZHAO Y L. Domestic trade barriers and border effect-the natural segmentation and policy barriers. South China Journal of Economics, 2012, (3): 13-22, 36.]
- [35] 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. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(4): 107-115. [WANG Y. Virtual water transfer calculation among China's regional trade based on whole industry caliber. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(4): 107-115.]
- [36] HOEKSTRA A Y. Virtual water trade: Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade//Value of Water Research Report Series No. 12. Delft. The Netherlands: UNESCO-IHE. <http://www.Waterfootprint.org/Reports/Report12.pdf>, 2003, 2012-04-06.

Water footprint and space transfer at provincial level of China based on MRIO model

SUN Cai-zhi¹, LIU Shu-bin²

(1. Center for Studies of Marine Economy and Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China; 2. Urban Planning and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China)

Abstract: Based on the input-output table of 31 provinces (autonomous regions and municipalities) in China in 2012, the water footprint and water footprint trade structure of the provinces in China were calculated and analyzed by establishing the I-O model of water resources expansion, and the spatial transfer pattern of the provinces was analyzed based on the interprovincial trade. The results showed that: (1) In 2012, the total amount of internal water footprint, the net input water footprint of international trade, and the net export water footprint of interprovincial trade were $4819.3 \times 10^8 \text{ m}^3$, $261.3 \times 10^8 \text{ m}^3$, and $801.6 \times 10^8 \text{ m}^3$, respectively. Inter-provincial trade played a leading role in the national water footprint trade. (2) In terms of the provincial-level region, 19 were net output provinces, such as Hebei and Heilongjiang, 12 were net input provinces, such as Beijing and Tianjin. In the view of the industry, the net output water footprint of the primary industry, the net input of the secondary industry, and the net output of the tertiary industry were $757.9 \times 10^8 \text{ m}^3$, $222.2 \times 10^8 \text{ m}^3$, and $4.6 \times 10^8 \text{ m}^3$, respectively. (3) The inter-provincial water footprint spatial transfer has the inconsistency between the source and the destination provinces, the geographical proximity of provincial transfer, and the phenomenon was obvious in resources-rich provinces and economically developed areas.

Keywords: MRIO model; water footprint; space transfer; China