

基于投入产出模型的省际虚拟水 流动关联分析与风险传递

檀勤良^{1,2,3}, 韩健¹, 刘源¹

(1. 华北电力大学 经济与管理学院, 北京 102206; 2. 北京市能源发展研究基地, 北京 102206;
3. 新能源电力与低碳发展研究北京市重点实验室, 北京 102206)

摘要:采用投入产出模型核算了我国各省份间的净虚拟水流量,并通过关联分析及量化的风险指标表征了虚拟水流动对输入地区的风险缓解与输出地区的风险增加作用。结果表明:净虚拟水流动在地区分布上具有明显差异,与虚拟水输入地区相比,输出地区集中于新疆、黑龙江、安徽等个别省份,其中新疆维吾尔自治区的净虚拟水高达 1.92×10^{10} 吨。地区间通过虚拟水的流动实现了水资源短缺风险的传递,虚拟水输出与输入双方增加或减少的风险具有显著的非对称性,新疆地区输出虚拟水增加的风险明显大于其输入对象降低的风险。从风险传递价值的角度出发,可通过调整行业税收、刺激跨区域消费或生产结构优化等方式适当鼓励黑龙江省与安徽省的虚拟水输出,减少新疆维吾尔自治区的虚拟水输出。

关键词:投入产出模型;虚拟水;关联分析;风险传递

中图分类号:P32 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0566(2021)06-0144-09

Correlation Analysis and Risk Transfer of Provincial Virtual Water Flow Based on Input-Output Model

TAN Qinliang^{1,2,3}, HAN Jian¹, LIU Yuan¹

(1. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. Research Center for Beijing Energy Development, Beijing 102206, China;
3. Beijing Key Laboratory of Renewable Electric Power and Low Carbon Development,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In this paper, the interprovincial net virtual water flows in China were calculated by the input-output model, and the effect of the interprovincial flows on passing of risk among regions were characterized by correlation analysis and quantified risk indicators. The results show that the distribution of net virtual water flows varies significantly in different regions. Compared with the virtual water input regions, the output regions are concentrated in Xinjiang, Heilongjiang, Anhui provinces, in which the net output flow in Xinjiang is as high as 1.92×10^{10} tons. With the flow of virtual water, the risk of water shortage is transmitted among regions. However, there is significant asymmetry between the increased risk of output regions or reduced risk of the input regions. When Xinjiang exports virtual water to its outside, the increased risk of Xinjiang is obviously greater than the reduced risk in the input regions. From the perspective of risk

收稿日期:2020-12-20 修回日期:2021-04-28

基金项目:国家自然科学基金项目“区域电力系统结构演进及其水-能-排耦合研究”(71874053)。

作者简介:檀勤良(1969—),男,福建福州人,华北电力大学经济与管理学院教授、博士生导师,研究方向为能源经济与政策模拟。

transmission value, the virtual water output of Heilongjiang province and Anhui province can be appropriately encouraged and the virtual water output of Xinjiang can be reduced by adjusting industry tax revenue, stimulating cross-regional consumption or optimizing production structure.

Key words: input output model; virtual water; correlation analysis; risk transfer

作为工业生产与生活的必需品,水资源的安全供应至关重要^[1]。由于区域水资源分配不均、地区经济发展水平及用水效率不同,地区之间的水资源压力具有明显差异^[2]。水资源以虚拟水的形式凝聚在商品中,伴随地区间的经济联系不断加深,商品交换引起的区域间水资源置换量越来越大^[3-4]。通过调节商品贸易改变虚拟水流动格局,是缓解区域水资源压力的有效方式之一,近年来受到国内外学者的广泛关注^[5-14]。将生产过程中消耗的水资源量定义为产品隐含的虚拟水量,对于水资源压力较大的地区,可通过输入虚拟水含量较多的产品,来减少当地生产该产品消耗的水资源^[15]。

国内外学者对虚拟水的流动进行了大量的研究工作,目前多采用自上而下的投入产出法进行分析,将隐含在商品贸易中的虚拟水定量化来进行研究。在研究内容上,主要包括水足迹的定量核算、虚拟水流动的驱动因素分析以及对特定区域的总体影响等方面。例如,文献[8]基于1997年与2010年多区域投入产出表计算了区域间虚拟水转移量,并与人口迁移、产业转移进行关联分析,表明了人口迁移与产业转移是虚拟水流动的驱动因素之一。文献[9]基于2007年多区域投入产出表系统分析了我国各地区农业虚拟水流动格局,结果表明西北地区尤其是新疆的农业部门虚拟水流动活跃程度高于其他地区。文献[10]使用投入产出分析核算了全国燃煤电厂寿命周期用水情况,并结合区域水资源胁迫指数(WSI)分析了火力发电对区域水资源压力的影响情况。文献[11]对京津冀与江浙沪地区的水足迹进行对比分析,表明京津冀地区的取水与耗水量小于江浙沪地区,两地的能源部门中电力生产的水足迹占比最高。

现有对虚拟水流动的研究内容均基于投入产出表进行特定区域、特定产业的虚拟水流动核算,

分析虚拟水流动过程中的驱动因素以及不同因素对虚拟水流动格局的影响情况。在研究过程中,忽略了虚拟水流动过程中对输入—输出地区双方所造成的相对影响。实际上,商品贸易过程隐含的虚拟水流动一方面缓解了贸易输入地区的水资源压力,另一方面却导致了贸易输出地区水资源压力升高。即在商品贸易的过程中,水资源压力从较高地区传递到较低地区,这是一种重要的风险转移方式。基于这种风险转移的方式,本文将区域水资源压力、区域间虚拟水流动关联系数以及凝结在商品贸易中的净虚拟水流量相结合,定量研究水资源短缺风险,测度不同地区通过虚拟水流动转移的风险量,对探索通过商品贸易调整虚拟水分布格局,促进水资源合理分配及探索水资源的可持续管理途径具有重要的意义。

二、研究方法与数据来源

(一) 省际投入产出模型

本文使用2012年30个省份30个部门的多区域投入产出表进行虚拟水足迹核算,相关数据来自Mi等(2017)^[16]的研究成果。由于本文的研究重点为不同省份间的虚拟水流动,因此将单一省份的30个部门进行整合,与之对应的终端需求做同样处理,合并生成一张省际投入产出表(见表1)。

表1 省际投入产出

变量	中间生产			终端需求			出口	其他	总产出
	1	……	30	1	……	30			
省份	北京	……	新疆	北京	……	新疆			
1 北京	Z ₁₁	……	Z _{1n}	F ₁₁	……	F _{1n}	E ₁	ERR ₁	X ₁
……	……	……	……	……	……	……	……	……	……
30 新疆	Z _{n1}	……	Z _{nn}	F _{n1}	……	F _{nn}	E _n	ERR _n	X _n
水资源消耗量	W ₁	……	W _n	终端需求耗水由中间生产供给					
进口	I ₁	……	I _n						
增加值	V ₁	……	V _n						
总投入	X ₁	……	X _n						

其中,省际中间生产为该省30部门的合并数据,如下所示:

$$Z_{nm} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^{30} Z_{ij11} & \cdots & \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^{30} Z_{ij1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^{30} Z_{ijn1} & \cdots & \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^{30} Z_{ijnn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

同理,省际终端需求做同样处理,合并处理过程如下所示:

$$F_{nm} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^5 F_{ij11} & \cdots & \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^5 F_{ij1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^5 F_{ijn1} & \cdots & \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^5 F_{ijnn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

(二) 虚拟水流动核算

为核算隐含在商品贸易流中的虚拟水流动,首先计算直接用水系数矩阵 C_w :

$$C_w = [W_1/X_1, \dots, W_n/X_n] \quad (3)$$

其中, W 为省级水资源消耗量,具体数据可以在国家统计局获得, X 为省级总产出。

直接用水系数反映了各省单位经济产出直接消耗的水资源量,将该系数与完全需求矩阵相乘,即可得出完全用水系数矩阵:

$$C_w' = C_w \times (I - A)^{-1} \quad (4)$$

在式(4)中, A 为直接需求系数矩阵。完全用水系数反映某省份单位经济产出消耗的直接与间接水资源量总和。将该系数与不同去向的终端消费结合,即可得出用于省内消费与流向省外的虚拟水流量。

$$VW = C_w' \times (I - A)^{-1} \times F \quad (5)$$

在本文中,由于中间生产部门合计为省级,单一省份的直接需求系数矩阵 A 变为省际投入产出表直接需求矩阵的中主对角线元素 a_i 。于是,在省际投入产出表中,虚拟水的转移量可以按照下式进行计算:

$$VW_{ij} = C_{wi} \times (1 - a_i)^{-1} \times (Z_{ij} + F_{ij}) \quad (6)$$

在式(6)中, VW_{ij} 代表省份 i 通过商品贸易流入省份 j 的虚拟水量, C_{wi} 代表省份 i 的直接用水系数, Z_{ij} 与 F_{ij} 分别代表省份 i 传递到省份 j ,用于中间生产与终端需求的商品贸易流动。

在公式(6)中, Z_{ij} 与 F_{ij} 相加的原因在于:对于

省份 i 流入省份 j 的商品而言,没有必要区分省份 j 将这部分商品用于中间生产或终端需求,本质上,这两部分均为省份 j 对省份 i 的需求,是省份 i 终端需求的一部分。

省际虚拟水流动的全部元素构成了总虚拟水流动矩阵 VW_{total} ,基于总虚拟水流动矩阵,计算省间虚拟水净转移量。基于总虚拟水流动矩阵,计算省间虚拟水净转移量。首先,采用以下公式计算区域间的净虚拟水转移矩阵^[17]:

$$VW_{net-trans} = VW_{total} - VW_{total}^T \quad (7)$$

净虚拟水转移矩阵中的元素表示区域间虚拟水双向流动的差值。矩阵中主对角线元素为 0,代表区域内部虚拟水消费无转移;对角线两侧元素互为对称相反数,正负号代表流动方向,绝对值代表净流量。令转移矩阵中数据为负的元素归零,以更清晰地表示虚拟水单向净流动,即得到净虚拟水分配矩阵 VW_{net} 。

基于净虚拟水分配矩阵,可以计算流入与流出节点省份的净虚拟水流量为:

$$VW_{net-im} = i'VW_{net} \quad (8)$$

$$VW_{net-ex} = VW_{net}i \quad (9)$$

在式(8)、式(9)中, i 为所有元素均为 1 的 30×1 的列向量,矩阵右乘 i 可对原矩阵进行行求和; i' 为 i 的转置,矩阵左乘 i' 可对原矩阵进行列求和。因此省级最终虚拟水净流量为:

$$VW_{net-f} = VW_{net-ex} - VW_{net-im} \quad (10)$$

在式(10)中, VW_{net-f} 为正代表该省最终为虚拟水出口地区,为负则代表该省最终为虚拟水进口地区。

(三) 虚拟水流动关联系数

1. 后向关联指标——影响力系数

投入产出表的横向与纵向代表不同含义,中间生产矩阵的纵向代表各部门的生产投入结构。当某一部门需要扩大生产时,所有部门都需按照这一部门的纵向比例增加投入。基于此,拉斯穆森提出了影响力系数^[18],反映了某部门的单位生产需求对其他部门的影响情况:

$$B = \frac{ni'(I - A)^{-1}}{i'(I - A)^{-1}i} \quad (11)$$

基于影响力系数的概念,本文引入直接用水系数对其进行改进,以反映某省份单位生产需求对其他省份虚拟水输入的影响情况,得到虚拟水影响系数:

$$B_w = \frac{n_i' \hat{C}_w (I - Z_{nm}/\hat{X})^{-1}}{i' \hat{C}_w (I - Z_{nm}/\hat{X})^{-1} i} \quad (12)$$

2. 前向关联指标——感应度系数

投入产出表的横向代表各部门产出的分配情况,与影响力系数类似,拉斯穆森提出了感应度系数,表示所有部门全部增加一单位最终需求时,该部门受到的需求感应程度:

$$E = \frac{n(I - A)^{-1} i}{i'(I - A)^{-1} i} \quad (13)$$

基于感应度系数的概念,引入直接用水系数对其进行改进,以反映其他省份增加需求时该省份的虚拟水输出感应程度,得到虚拟水感应系数:

$$E_w = \frac{n \hat{C}_w (I - Z_{nm}/\hat{X})^{-1} i}{i' \hat{C}_w (I - Z_{nm}/\hat{X})^{-1} i} \quad (14)$$

(四) 水资源风险指标

由于不同地区水资源压力不同,与其他地区的贸易关联不同,因此产生水资源短缺的风险不同。风险的量化有多种方式,本文将区域水资源胁迫指数(WSI)与虚拟水流动关联系数结合,得到水资源综合风险指标,再将综合风险指标与省间净虚拟水转移量结合,以量化虚拟水流动过程中传递的风险。

1. 水资源胁迫指数

Pfister 等^[19]提出了水资源胁迫指数(WSI)来表示区域水资源压力,该指数越高,代表该地区发生水资源短缺的可能性越大^[13-14]:

$$WSI = \frac{1}{1 + e^{-6.4WTA * (\frac{1}{\alpha} - 1)}} \quad (15)$$

在式(15)中,WTA*为考虑降水不确定性与流域蓄水能力^[20]的取水量/可用水量指标。本文中,30个省份的水资源胁迫指数采用Chai等(2018)^[10]的研究结果。

2. 水资源短缺综合风险指标

对WTA*指数进行非线性归一化处理,转化

为[0.01,1]区间内的数字,即得到了WSI。经过转化的WSI可视作水资源短缺风险发生的可能性^[13-14]。当风险发生的可能性较大时,可采取增加输入或减少输出两种方案来缓解风险。式(12)得到的虚拟水影响系数反映了某省份单位产出对其他省份虚拟水流动的影响程度,当影响程度较高时,无论增加输入或减少输出均会产生相对较大的不利影响。基于此,将风险发生的可能性与风险产生的影响结合,计算水短缺综合风险指数:

$$R_i = WSI_i \times B_{wi} \quad (16)$$

该指数表明了区域水资源压力越大、对其他省份虚拟水流动的影响越深,其水资源短缺综合风险越高。除影响系数之外,感应系数也可从风险的角度去定义。若某省份的虚拟水感应系数较低,说明该省份对其他省份需求变更的敏感度较小,其抗风险能力相对较强。基于此,结合水资源胁迫指数与虚拟水感应系数得到水资源抗风险指数:

$$AR_i = \frac{1}{WSI_i \times E_{wi}} \quad (17)$$

R与AR在数值上差异较大,为了在同一框架下对不同指标对比分析,分别采用极差变换将两种指标进行归一化处理:

$$X_{gyi} = \frac{X_i - X_{imin}}{X_{imax} - X_{imin}} \quad (18)$$

在式(18)中,X代表归一化指标R或AR。

3. 虚拟水流动风险传递

(1)传递量的计算:区域水资源消耗一部分源于满足省内需求,另一部分通过商品贸易满足外省需求。本文中,将满足外省需求的净虚拟水传递分离出来,结合水资源综合风险指数R,量化虚拟水贸易传递的水资源风险:

$$RT = VW_{net-trans} \times W^{-1} \times \hat{R}_{gy} \quad (19)$$

需要注意,计算风险传递时要考虑到输入—输出双向性,即不能使用去负值的分配矩阵 VW_{net} 计算风险值。这是由于不同地区水资源压力不同,当发生虚拟水流动时,输出地区增加的风险与输入地区减少的风险是不同的。为了得到不同省份通过虚拟水贸易传递的总风险量 R_{trans} ,采用下式计算:

$$R_{trans} = i' \times RT \quad (20)$$

当 R_{trans} 中的元素为正时,该数值代表该地区由于输入虚拟水而降低的风险量。当 R_{trans} 为负时,该数值代表该地区由于输出虚拟水而增加的风险量。

(2)传递价值的计算:在价值工程中,价值的表达式为:价值(V)=功能(F)/成本(C),本文基于此,计算了虚拟水流动的风险传递价值:传递价值=虚拟水输入地区风险降低量/虚拟水输出地区风险增加量。

三、结果与讨论

(一)净虚拟水转移

根据部门合并后的 2012 年省级投入产出表计算 30 个省份的最终虚拟水净转移量(由于 2012 年投入产出表中未包含西藏自治区及港澳台地区数据,故本文中未考虑这些地区的虚拟水风险传递情况),结果如图 1 左图所示。从图 1 中可以看出,净虚拟水的输出省份有 15 个,其中主要输出地为:新疆、黑龙江、安徽,此结果与杜依杭等(2019)^[8]核算的 2010 年虚拟水转移一致。净虚拟水的输入省份有 15 个,主要有:山东、浙江、广东、北京等地。与净虚拟水输入相比,净虚拟水输出主要集中在个别省份,其中新疆地区净虚拟水输出量高达 1.92×10^{10} 吨。在所有省份中,贵州、海南、吉林、青海等地的净虚拟水转移量较低,说明这些地区的虚拟水输入与输出量较为平衡,在流动过程中相互抵消,因此净总量趋近于零。

为展示省间净虚拟水转移的具体方向及流量,本文绘制了净虚拟水流向图,结果如图 1 右图所示。图 1 中各省份的虚拟水用颜色深浅表示,省份的弧度大小代表其虚拟水总流量的大小,省份间的弦粗细代表虚拟水转移量的大小,转移方向由弧线颜色与弦颜色决定。从图 1 中可以看出,净虚拟水转移量最大的省份为新疆维吾尔自治区,其输出地遍布全国,主要输出地区为山东、河北、江苏、浙江、上海等东部相对较发达地区。除新疆维吾尔自治区外,黑龙江省、安徽省同样是净虚拟水输出的重点地区,黑龙江省的净虚拟水输出地主要为辽宁省与山东省,安徽省的净虚拟水输出地为江苏省。

(二)虚拟水关联分析

为分析不同省份之间的虚拟水传递关系,本文基于影响力系数与感应度系数进行改进,计算虚拟水影响系数与虚拟水感应系数,结果如图 2 所示。从图 2 可以看出,新疆维吾尔自治区的虚拟水影响系数远高于其他省份,说明新疆维吾尔自治区为满足自身生产生活需求,需要其他地区对其输入大量的虚拟水资源。

当区域水资源短缺风险较高时,可以采用减少虚拟水输出或增大虚拟水输入的方式来缓解压力。然而,在虚拟水影响系数较高的情况下,无论减少虚拟水输出或增加虚拟水输入都会对当地乃至全国产生相对较大的不利影响。这是由于有以下两方面的原因。

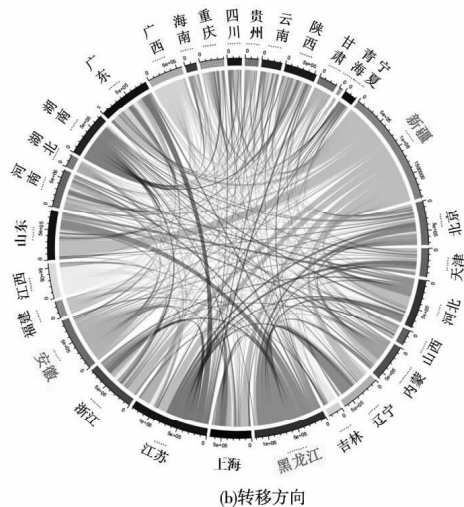
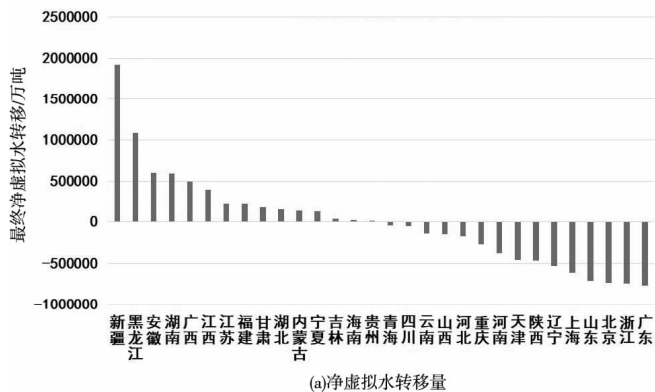


图 1 2012 年省间净虚拟水转移量与转移方向

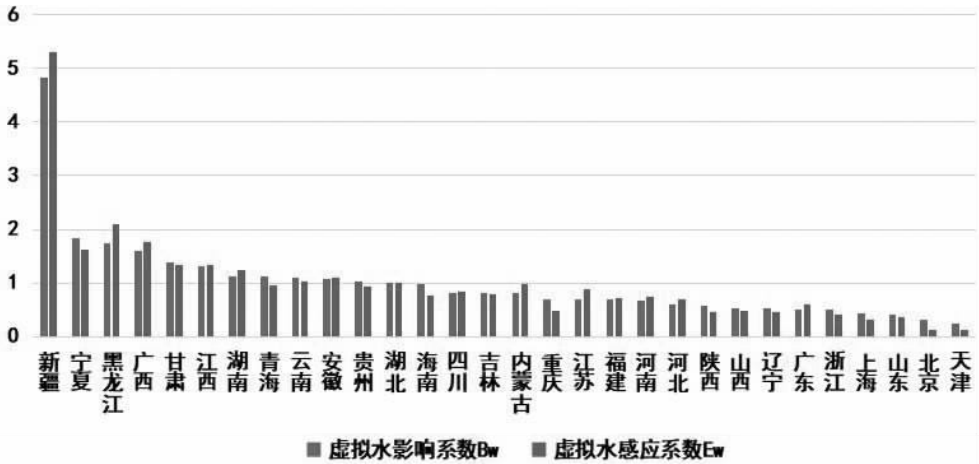


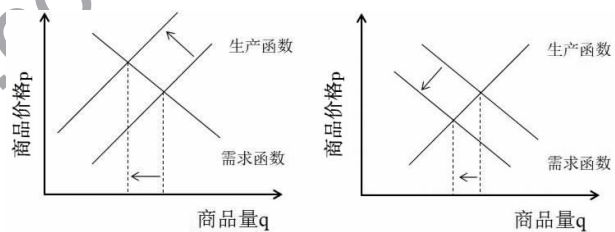
图2 省间虚拟水流动关联指标

(1)为减少虚拟水输出,政府可以采用增加税收的方式扩大生产成本,引导生产函数曲线上移,这会导致局部市场均衡后的部门生产规模缩小(见图3a),造成部门增加值的降低,这会对当地居民收入及地区生产总值产生不利影响,损害自身的经济利益。同时,当地生产规模的缩小会减少其他省份与当地的贸易量,若考虑整个国民经济的一般均衡,则其他省份的经济也会因此受到不利影响。

(2)为扩大虚拟水输入,政府可以采用发放跨省消费优惠券的方式,鼓励水资源短缺地区向水资源充足地区购买隐含虚拟水较多的商品,刺激跨区域消费,这会出现两种情况:当输入的虚拟水用于满足当地终端需求时,由于当地需求有限,在部分需求依靠外来输入满足后,势必造成对当地产品需求量的减少,引导需求函数曲线左移(见图3b),同样造成局部市场均衡后生产规模的缩小,进而出现前文所述的情景;当输入虚拟水用于满足中间生产需求时,由于新疆维吾尔自治区的虚拟水影响系数相对较高,单位产品生产过程中对其他地区的水资源需求较大,因此会对其他地区的水资源产生更为严重的影响。综上,当虚拟水影响系数较大时,缓解水短缺产生的影响更大,因此综合风险更高。

与其他省份相比,新疆维吾尔自治区的虚拟水感应系数也最高,说明新疆维吾尔自治区为其他省份的生产贡献了大量的虚拟水资源。当其他

省份需要增加虚拟水输入时,对感应度较高的新疆维吾尔自治区影响最大。此外,新疆维吾尔自治区的虚拟水感应系数高于影响系数,这在一定程度上决定了该省份为净虚拟水输出省份的局面。基于这种情况,在采取虚拟水调控方式缓解某些地区的水资源压力时,为了兼顾对其他地区的影响,应当尽量将贸易目标定位于关联系数较小,同时水资源压力较低的省份或地区,以避免产生严重的连锁反应,使虚拟水风险较高地区的风险进一步扩大。



a. 扩大生产成本

b. 减少需求

图3 市场均衡变化示意

(三)水资源压力与综合风险分析

综合不同省份的水资源压力与虚拟水关联系数,计算不同省份的综合风险指数及抗风险指数,以量化不同省份的水资源风险,计算结果如图4所示。由图4可知,水资源压力较小的地区抗风险程度相对较大,且综合风险更低。综合风险较高的地区则集中出现在水资源压力较大的地区。值得注意的是,同样是主要的虚拟水出口地区,新疆维吾尔自治区的水资源综合风险明显高于黑龙江省

与安徽省。这是由于黑龙江省与安徽省的区域水资源压力较低,其省内生产生活取水量小于其可用水资源总量。对于北京、天津、山西等地,虽然同样是水资源胁迫指数较高的地区,但这些地区的虚拟水影响系数较低,通过输入虚拟水来缓解风险对其他地区的影响较小。因此,这些地区通过虚拟水的输入缓解了部分水资源压力,在一定程度上降低了风险。

(四) 水资源风险传递分析

不同地区水资源压力不同,通过虚拟水流动传递的风险也不同,将这两种量化的指标进行多省份间的对比分析,结果如图 5 所示。由图 5 可看出,水资源压力较大的地区多为北方地区与西北

地区的省份。其中,北京、天津、山西等地的水资源压力最高,但在省间贸易中依靠净虚拟水输入缓解了部分水资源压力,将当地的部分风险转移到了国内其他地区。除此之外,河北、宁夏、山东、新疆、甘肃等地区同样具有较高的水资源压力。其中,宁夏、甘肃、新疆等地通过各省间贸易增加了水资源短缺风险,进而导致其综合风险指数较高,这个现象以新疆维吾尔自治区最为明显。

为了更清晰的表示出各省份间的虚拟水流动对输入与输出地区的影响,本文绘制了部分地区的风险传递矩阵图,结果如图 6 所示。从矩阵图中可以看出,主对角线两侧的数据具有明显差异,这说明由于水资源压力的不同,依靠虚拟水流动传

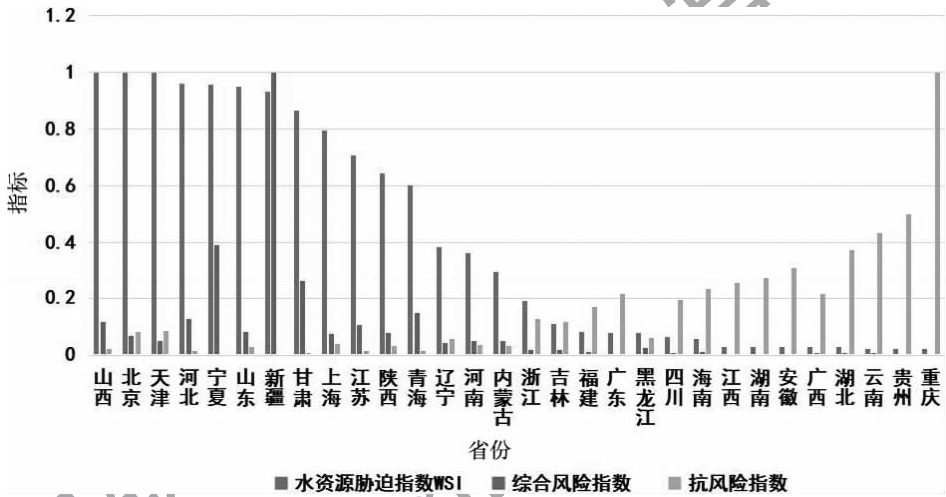


图 4 水资源短缺综合风险与抗风险指标

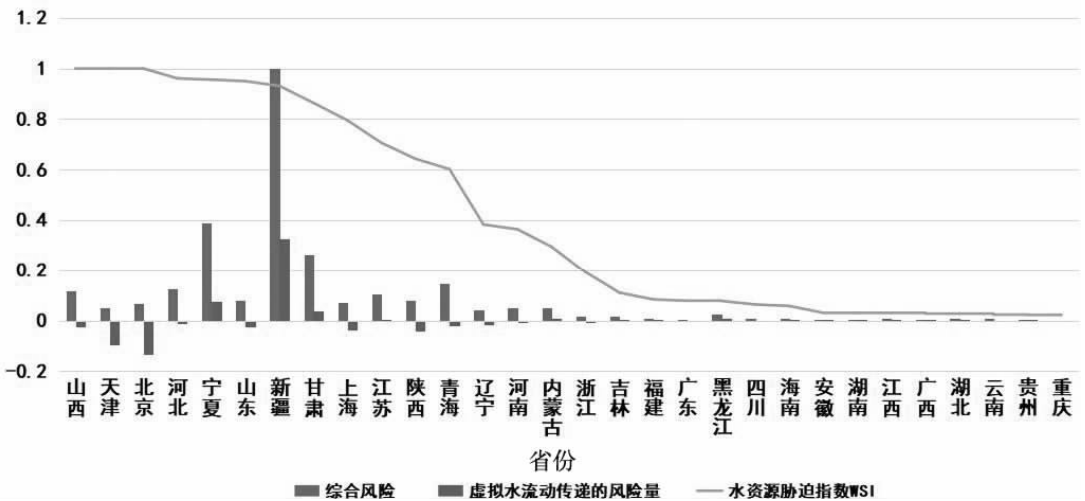


图 5 水资源压力与虚拟水流动风险传递

递的风险量对输入与输出双方造成的影响是非对称的。以综合风险较高的新疆维吾尔自治区为例进行分析,新疆与河北之间的虚拟水流动,导致河北省的风险量降低了 11.94×10^{-3} 个单位,然而,新疆维吾尔自治区的风险量却增加了 31.09×10^{-3} 个单位,从风险传递价值角度分析,传递价值仅为 0.38。对于本就风险较高的新疆维吾尔自治区而言,这些价值较低的风险转移是需要重点关注与调整的部分。与之相对的,可以通过非对称且价值较高的虚拟水流动将水资源压力较高地区的风险转移到较低地区。例如,北京市通过与黑龙江省的虚拟水流动降低了 15.08×10^{-3} 个单位的风险量,然而黑龙江省却仅提高了 0.641×10^{-3} 个单位的风险量,传递价值高达 24.65。说明黑龙江省的虚拟水输出对其内部负担较小,可以保持在相对较高的水平。与之类似的还有安徽省,两者均为高虚拟水输出、低风险增加的区域。对于这一类的省份,建议保持甚至进一步提高虚拟水输出量,这样更有利于平衡不同区域间虚拟水流动带来的风险。

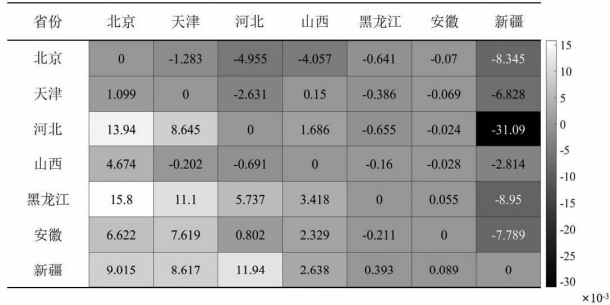


图6 部分地区的风险转移矩阵

(注:从矩阵纵向看,正值颜色变浅的单元代表净虚拟水输入降低风险,负值颜色变深的单元代表净虚拟水输出增加风险)

与北方地区、西北地区相比,南方地区的水资源压力普遍较低,其 WSI 多在 0—0.1 之间。从缓解北方地区水资源压力的角度来分析,应当适当调整产业结构,将虚拟水含量较多的产品转移到南方生产。当然,要充分考虑该过程的可行性。如农业部门需要考虑作物的生长环境,有些作物不适合在南方生长,对于这种情况,需要从其他角度去解决水资源压力的情况。如新疆地区的虚拟水出口遍布全国各地,且主要的出口部门为农业与食品加工部门,这说明这些部门生产的产品足

够满足其内部生活所需。可通过适当减少这些产品的生产以达到缓解水资源压力的目的。通过市场自身的调节作用,跨省贸易产品量的降低会导致其产品价格的提高,这个过程也许会产生一些附加的收益,如带动当地旅游业的发展。

此外,对钢铁、电力等工业生产部门而言,水耗量大主要源于其落后的生产工艺。对于这样的问题,可以通过改进生产工艺,提高用水效率来解决。以电力部门为例,火力发电过程的取水量巨大,这是由于热机的循环过程需要使用大量的冷却水,然而可以采用空冷或其他复合冷却方式降低水耗。同时,进一步调整电力生产结构,如通过大力发展风电、光伏等新能源电力,来提高电力行业整体的节水效能,不但可以解决我国部分地区水资源压力的问题,而且对应对区域性能源短缺问题及环境污染问题均有很好的效果。在 30.60 双碳目标的导向下,这些改进也是未来电力部门发展的必然趋势。

四、结论

本文首先通过多区域投入产出模型核算了不同省份之间的虚拟水转移足迹,量化了不同省份间为满足生产生活所需而传递的净虚拟水量。然后基于影响力系数与感应度系数计算了虚拟水影响系数以及虚拟水感应系数,对不同省份的虚拟水传递进行关联分析。最后,建立了水资源胁迫指数、水资源短缺综合风险指数等风险评价指标,量化各省份的水资源压力、风险与抗风险水平,并计算了净虚拟水流动传递的风险量与传递价值,结果表明:(1)净虚拟水输入与输出地区在数量上近乎持平,而流动量在地区分布上具有明显差异。与净虚拟水输入地区相比,输出地区集中于新疆、黑龙江、安徽 3 个省份。(2)北方地区与西北地区的水资源压力明显高于南方地区,北京、天津、山西等地在各省间贸易中依靠虚拟水输入缓解了部分水资源压力,将风险转移到国内其他地区。宁夏、甘肃、新疆等地通过各省间贸易增加了水资源短缺风险,进而导致其综合风险指数较高。(3)虚拟水流动传递的风险具有非对称性,新疆维吾尔自治区通过虚拟水输出增加的风险远高于其输入

地区降低的风险。然而,黑龙江省与安徽省通过虚拟水输出增加的风险却明显小于其输入地区降低的风险。从风险传递价值的角度出发,应当鼓励黑龙江省与安徽省的虚拟水输出,减少新疆维吾尔自治区的虚拟水输出。

参考文献:

[1]孙才志,刘玉玉,陈丽新,等. 中国粮食贸易中的虚拟水流动格局与成因分析——兼论“虚拟水战略”在我国的适用性[J]. 中国软科学, 2010(7):41-49.

[2]李世祥,成金华,吴巧生. 中国水资源利用效率区域差异分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(3): 215-220.

[3]严冬,周建中,孙怀卫,等. 基于虚拟水流动均衡性的农业用水综合调控[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 91-98.

[4]朱力源. 基于虚拟水流动模式下水资源调控研究[J]. 地下水, 2019, 41(3):65-67.

[5]陈丽新,孙才志. 中国农产品虚拟水流动格局的形成机理与维持机制研究[J]. 中国软科学, 2010(11):44-53.

[6]许长新,马超,田贵良,等. 虚拟水贸易对区域经济的作用机理及贡献份额研究[J]. 中国软科学, 2011(12): 115-124.

[7]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(2): 286-294.

[8]杜依杭,王钧,鲁顺子,等. 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[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019(6).

[9]吴兆丹,赵敏, LALLU pmanu. 我国地区农林牧渔业虚拟水流动格局研究——以经济区域与省区为空间尺度[J]. 软科学, 2016, 30(11):44-47.

[10]CHAI L, LIAO X, YANG L, et al. Assessing life cycle water use and pollution of coal-fired power generation in China

using input-output analysis[J]. Applied energy, 2018(231): 951-958.

[11]LIAO X, ZHAO X, JIANG Y, et al. Water footprint of the energy sector in China's two megalopolises[J]. Ecological modelling, 2018, 391.

[12]A G D, A F L, B L W, et al. Social network analysis of virtual water trade among major countries in the world[J]. Science of the total environment, 2020.

[13]A W Z, A X F, B Y L, et al. Spillover risk analysis of virtual water trade based on multi-regional input-output model - a case study[J]. Journal of environmental management, 275.

[14]LIU Y, CHEN B. Water-energy scarcity nexus risk in the national trade system based on multiregional input-output and network environ analyses [J]. Applied energy, 2020 (268):114974.

[15]HOEKSTRA A Y. Virtual water trade: proceedings of the International Expet Meeting on Virtual Water Trade, IHE Delft, The Netherlands, 12-13 February 2003.

[16]MI Z, MENG J, GUAN D, et al. Chinese CO₂ emission flows have reversed since the global financial crisis[J]. Nature communications, 2017, 8(1).

[17]王双英,陆文聪. 江西虚拟水消费与贸易研究——基于投入产出分析[J]. 长江流域资源与环境, 2011(8): 34-38.

[18]RASMUSSEN P N. Studies in inter-sectoral relations [M]. North-Holland: Einar Harcks, 1956.

[19]PFISTER S, KOEHLER A, HELLWEG S. Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(11):4098-104.

[20]CHRISTER, NILSSON, CATHERINE A, et al. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems [J]. Science, 2005, 308(5720):405-408.

(本文责编:海 洋)