

中国省际虚拟水生态补偿研究

李 艳,张巧良

(兰州理工大学经济管理学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要:省际贸易导致中国省域间虚拟水转移存在经济收益与环境成本不对等的 unfair 现象,为了促进区域间协调发展,需要通过跨区域生态补偿方式来平衡资源环境利用主体间的利益关系。根据区域生态补偿的理论,若一个地区的发展占用了其他地区的生态资源,理应就占用部分的生态资源对被占用地区进行补偿。基于“谁受益,谁承担”的公平性原则,构建中国省际虚拟水占用责任公平配置模型,得到公平共担责任原则下的水资源占用量,并以此构建跨区域虚拟水生态补偿模型,完善中国虚拟水生态补偿机制。

关键词:中国省际虚拟水;虚拟水生态补偿;虚拟水占用责任配置模型

中图分类号:F069.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0566(2022)08-0079-13

Research on China's inter-provincial water ecological compensation

LI Yan, ZHANG Qiaoliang

(School of Economics and Management, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Provincial trade could lead to the unequal unfairness Phenomenon of economic benefits and environmental costs in the transfer of virtual water between provinces in China, in order to promote the coordinated development between regions, it is necessary to balance the interests of resources and environment among subjects through cross regional ecological compensation. According to the theory of regional ecological compensation, if the development of one region occupies the ecological resources of other regions, it is reasonable the occupied area shall be compensated for the ecological resources of the occupied part. This study is based on the fairness principle of "who benefits, who bears", this study constructs the fair allocation model of China's provincial virtual water to derive the water resources occupation under the principle of fair sharing responsibility. On this basis, this study constructs the cross regional virtual water ecological compensation model, and perfects the cross provincial virtual water ecological compensation mechanism in China.

Key words: virtual water; ecological compensation; the fair allocation model of china's provincial virtual water

改革开放以来,我国经济发展迅速,但是在实现 GDP 总量飞速增长的同时,对自然资源和生态环境造成了极大破坏,水资源短缺、水环境恶化已经严重制约我国经济的可持续发展。面对我国北

方水少、南方水多的不平衡分布现状,南水北调等跨流域调水工程被建设来缓解北方地区水资源短缺问题,并发挥了重要的作用。除此以外,有学者提出可以提倡实物进出口贸易,将隐含在实物中

收稿日期:2022-04-06 修回日期:2022-07-17

基金项目:国家自然科学基金项目(91747208);甘肃省教育科学“十三五”规划项目(GS[2020]GHB4756);甘肃省科学技术厅科技计划项目(20CX9ZA046、21CX6ZA067)。

作者简介:李艳(1979—),女,甘肃兰州人,兰州理工大学经济管理学院副教授,博士,研究方向为资源环境管理与会计。

的水资源从水资源丰饶的国家和地区交换至水资源匮乏的国家和地区,通过虚拟水^①贸易来解决水资源短缺问题。因此,为了发挥虚拟水战略对中国水资源优化配置作用,有必要对中国省域间虚拟水转移的基本特征、驱动因素、调控机制进行研究,从而优化中国虚拟水的转移方向与路径。同时,由于区域间资源禀赋、产业结构、技术水平以及价值链分工差异,不同地区在贸易中存在经济收益与环境成本不对等现象,造成贸易虚拟水不公平性问题,不利于促进区域间协调发展。为此,需要通过生态补偿方式来调节资源环境利用主体间的利益关系,并合理约束和引导不同地区的用水行为,从而促进中国水资源的合理利用及经济的可持续发展。

一、水生态补偿相关研究

国内外学者对于生态补偿以及流域生态补偿的研究主要围绕补偿主客体、模式、标准等方面展开^[1]。尽管在生态补偿以及流域生态补偿方面的研究成果较多,但主要关注流域实际用水补偿,而对虚拟水补偿的研究较少。

(一) 流域生态补偿的主客体研究

国外学者认为,补偿主体是生态系统产品与服务的受益者或接受者,通常政府与个人是最主要的补偿主体;受偿主体是生态系统产品与服务的供给者。Cranford 等^[2]认为应该建立一个多层次的受偿主体结构,有利于针对不同受偿主体实施不同的补偿方案。Escobar 等^[3]对哥伦比亚的博罗河流域的生态补偿状况进行了研究,受偿主体为上游的居民,补偿主体则是下游地区的水资源使用者。Pagiola^[4]研究了哥伦比亚的亚卡河流域生态补偿实施情况,将水源涵养和水质保护作为补偿客体。

国内学者认为,流域生态补偿主体与客体就是环境服务与产品的购买者与提供者。王克强等^[5]认为政府应通过转移支付等政策支持弥补节约农业水资源的贡献,将虚拟水贸易政策调整作为调节水资源供求的补充手段。刘红梅等^[6]用农

业虚拟水“资源诅咒”效应证明了发展经济学家刘易斯提出的丰富的自然资源不是经济增长的充分条件的观点。鉴于这些地区在国家粮食安全方面所作的重要贡献,只有政府实施财政转移支付,用以补偿这些地区在本地区经济增长方面的损失,才不至于影响其积极性^[7]。王爱敏等^[8]对水源区生态补偿进行了研究,认为补偿主体应包括中央政府、中下游政府以及用水的个人和集体,而补偿客体应是因水源区保护而利益受损的个人或集体。檀勤良等^[9]将赤水河流域作为研究对象,对比了喀斯特地区与非喀斯特地区的生态补偿状况,认为流域上游喀斯特地区与下游原始森林地区为生态输出地区,应作为补偿客体;非喀斯特地区以及城镇聚集地区应作为补偿主体。王西琴等^[10]以九江流域为研究对象,认为补偿主体应该为国家和流域下游,补偿客体为流域上游,并且根据水质与水量双目标核算相应的支付比例。

(二) 流域生态补偿的标准

生态补偿标准指的是补偿主体需要支付给补偿客体的具体补偿金额,生态补偿标准的确定即补偿金额多少的计算过程,它关系到补偿的科学性、可行性和实施效果^[11]。流域生态补偿标准常用的确定方法主要有生态系统服务价值法、成本核算法、支付意愿(CVM)法等。但是不管使用哪种方法都难以准确地衡量补偿标准,因此补偿标准的确定方法仍未达成共识^[12]。

有学者利用生态系统服务价值法确定补偿标准。兰绍清等^[13]以福建省大樟溪流域为例,使用生态系统服务价值法对生态保护红线区的补偿标准进行估算,最终的补偿标准为 29 241 万元。孟雅丽等^[14]利用 2013 年汾河流域的土地利用遥感影像测算了该流域的生态价值并确定其补偿标准与优先级,结果显示汾河下游段与经济发展落后的县域应优先获得补偿。许长新等^[15]认为提高水价是虚拟水战略实施的根本路径依赖,辅以适当

^① 虚拟水的概念是英国伦敦大学的 Tony Allan 教授在 1993 年的一次研讨会上提出的,它表示的是生产商品或服务过程中所需要的水资源数量,以“不可见”的形式寄存在产品和服务中,因而是虚拟的、无形的。

的财政补贴可以在实现节水的同时增加农户收益;虚拟水贸易将引发产业间的用水转移,优化水资源配置并实现当地产出的帕累托改进。张国兴等^[16]以南水北调中线水源区为研究对象,测算了2012—2016年水源区的生态系统服务价值并确定补偿标准,结果显示水源区应接受149.2亿元的补偿,而受水区愿意支付的生态补偿资金为84.37亿元,存在较大的生态补偿资金缺口。

成本核算法通常作为补偿标准的下限的重要方法。但是,直接成本反映补偿客体为了保护流域环境付出的实际资金量,而机会成本考虑了保护环境可能丧失的发展机会,所以直接成本核算出的金额通常要低于机会成本。张贵等^[17]对京津冀的流域生态补偿标准进行研究,采用直接成本法确定其补偿标准的下限;采用生态系统服务价值法确定其补偿标准的上限。李芬等^[18]以三江源为例,使用生态保护直接成本法确定该地区生态补偿标准,研究得出从2011年到2030年,该地区的生态补偿标准为4 095.4亿元。

条件价值法是以问卷的方式直接询问上下游地区各利益主体对于改善(或保护)水资源所愿意接受(或支付)的金额,并将其作为补偿标准的一种方法。张化楠等^[19]运用Probit与SEM模型对大汶河流域的居民生态补偿意愿进行测算,结果显示生态认知和生计资本对生态补偿的支付意愿具有正向激励作用。寇青青等^[20]以南水北调中线工程为例,综合运用水资源价值、排污损失、支付意愿等方法,测算了陕西水源区的生态补偿标准,结果显示陕西水源区应每年接受受水区62.42亿元的补偿金。尽管条件价值法可以用来确定补偿标准,但是在实际研究中,它更多地被用于确定流域居民参与补偿项目的影响因素研究。

(三)流域生态补偿方式

流域生态补偿方式指的是实现补偿的途径与方法,目的是解决怎么补偿的问题^[21]。通过转移支付与征收环境税的政府补偿模式及通过市场化交易方式实施的市场化补偿模式是目前最为广泛的两种方式。

政府补偿是补偿模式的重要组成部分。从支

付方式来看,它主要包括纵向补偿模式以及横向补偿模式。Engel等^[22]认为,政府付费模式更容易令民众接受,并且能够有效降低生态补偿政策的执行成本。Pascual等^[23]认为政府直接支付的纵向补偿模式对环境的保护效果更好。郑云辰等^[24]认为流域生态补偿模式可以分为政府补偿模式、市场补偿模式以及社会补偿模式3个类别。陈丽新^[25]认为若流域上游地区对流域环境保护投入了必要的资金进而使得下游地区获得了较好的流域生态服务,下游地区应该对上游地区予以补偿以弥补其保护成本。景守武等^[26]以新安江流域为研究对象,使用双重差分法研究了横向生态补偿的实施效果。杨荣金等^[27]以永定河流域为研究对象,提出了水质与水量双补偿模式并建立了永定河流域横向生态补偿的多层次沟通协调机制。刘桂环等^[28]认为流域横向生态补偿是促进流域不同地区生态与经济和谐发展的重要实现路径,在实现“生态—经济”和谐发展的同时还能实现流域上下游地区的绿色可持续发展。

市场化补偿模式是指基于市场交易机制并采用市场化交易手段以达到吸引社会资本加入生态补偿并拓展生态补偿资金筹集渠道,最终实现生态保护的一种补偿模式。Davis^[29]对美国湿地缓解市场的交易进行研究,结果显示美国湿地缓解市场活跃、交易频繁,每年的交易额高达30亿美元,已成为美国市场化生态补偿的承要组成部分。我国对关于市场生态补偿的研究也愈发重视。孙才志等(2010)^[30]从时空角度探讨“虚拟水战略”在我国的适用性,认为应注意增强对其生态补偿的功能,更好地保障“虚拟水战略”的实施。朱启荣等^[31-32]认为应制定差别性的出口退税政策,鼓励耗水少的产品出口,征收出口关税来限制高水耗产品的出口。陈惠雄等^[33]对目前我国一些地区实行的“生态公益林补偿”政策可能存在的低效率情形进行了深入分析,提出水资源管理由关注“山”向关注“地”转变的公共政策建议。

可以看出,现有研究针对实际用水的跨区域流域生态补偿,从生态补偿的主客体、补偿的标准以及补偿的方式等方面进行了丰富的研究。但

是,现有的水生态补偿研究很少涉及虚拟水补偿,目前的水生态补偿框架还未构建针对虚拟水的水生态补偿机制和方法,无法平衡资源环境利用主体间的利益关系,也不能合理约束和引导不同地区的用水行为,不利于中国水资源的合理利用及经济的可持续发展。为此,本文基于虚拟水转移矩阵和增加值转移矩阵,根据“谁受益,谁承担”的公平性原则,以贸易利益为分配因子,构建了中国省际虚拟水占用责任公平配置模型,实现中国各省市在省际贸易中达到经济收益(增加值)与环境成本(水资源占用量)一致的目标。本文以公平共担责任原则下的水资源占用量为基准,通过与实际用水量比较确定需要进行补偿的虚拟水份额,再结合基于各地区水资源稀缺程度及水价确定的生态补偿标准,构建补偿模型实施中国省际跨区域虚拟水生态补偿。从而健全虚拟水生态补偿理论

与方法,探索中国省际精准虚拟水生态补偿模式,为虚拟水生态补偿理论和方法的构建提供有益的科学参考。

二、中国省际虚拟水生态补偿框架

(一) 虚拟水生态补偿思路

图 1 展示了中国省际虚拟水生态补偿思路。首先,在“谁受益,谁承担”的公平性原则下,基于虚拟水转移矩阵和增加值转移矩阵,构建了中国省际虚拟水占用责任公平配置模型,以贸易利益为分配因子,分配各省域对中国省际虚拟水占用的环境责任,实现中国各省市在省际贸易中达到经济收益(增加值)与环境成本(水资源占用量)一致的目标。然后,根据流域水生态补偿工作秉承的“谁受益,谁补偿”基本理念,若一个地区的发展占用了其他地区的生态资源,理应就占用部分的生态资源对被占用地区进行补偿。

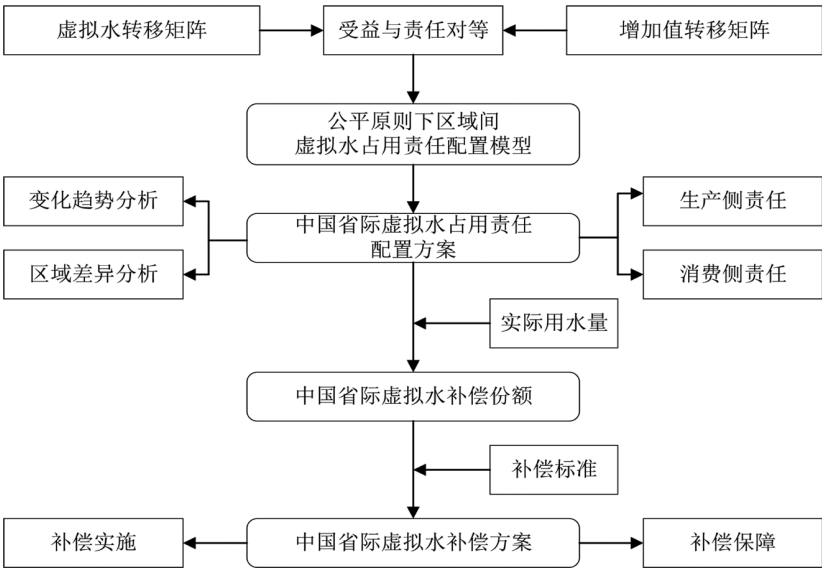


图 1 中国省际虚拟水生态补偿框架

(二) 虚拟水生态补偿技术

1. 虚拟水占用公平共担方案原则

对水资源的占用核算分为“生产者原则”和“消费者原则”。“生产者原则”的优势在于实践操作性强,能够明确地核算出生产者的直接用水量;弊端在于无法揭示通过产业转移或进口替代引致的额外水资源占用;“消费者原则”认为水资源占用应为消费者对产品生产过程中占用的水资源,这种方法虽然相对于“生产者原则”更加公平。但

是,若仅仅由消费者负责,缺乏对生产端的约束,生产者就没有动力改进生产技术以降低用水强度,不利于总体节水目标的实现,甚至会导致生产者为追逐利润盲目扩大生产,造成对水生态环境的破坏。而且,生产者也从出口贸易中获得了经济利益,如果水资源占用全部由消费者承担的话,对于消费者来说也是不公平的。

对于贸易隐含虚拟水占用责任划分,类似于碳排放的“共同但有区别责任”原则^[34],虚拟水占

用也应当由生产者和消费者共同承担,但不是将水资源占用责任简单地分配到生产端和消费端,而是要通过设定责任分担系数有区别地进行分配,实现公平合理的目标,充分调动贸易双方的节水积极性,从生产侧和消费侧共同促进高效用水和水环境保护,从而促进中国水资源和水环境保护目标达成。由于价值链分工差异,发达省份和欠发达省份在省际贸易中获得的经济收益与其承担的环境成本存在不对等现象,即贸易引致的省际虚拟水转移具有不公平性。因此,本文所要达到的公平性目标就是使得各省份在省际贸易中应承担的水资源占用责任与其获得的经济收益达成一致。从这个角度来看,公平共担原则可以有效克服上述“生产者责任”原则和“消费者责任”原则的利弊,实现生产者与消费者对水资源占用责任划分的公平性。

2. 分担方案

公平共担原则下的生产者与消费者水资源占用责任共担,从受益与责任的匹配的原则出发,将贸易隐含虚拟水在生产地和消费地进行公平合理的分摊,但二者所承担的水资源占用责任却有所有区别。下面探讨如何实现公平共担原则下的生产者与消费者的水资源占用责任分摊。

假设任意两个省份 r 省份和 s 省份,它们间存在省际贸易导致的虚拟水和增加值的双边转移关系,如图2所示。根据省域间虚拟水转移矩阵和贸易增加值转移矩阵,可以得到 r 省份向 s 省份转移的虚拟水和增加值分别为 $vw_{Y^r}^r$ 和 $ev_{Y^r}^r$, s 省份向 r 省份转移的虚拟水和增加值分别为 $vw_{Y^s}^s$ 和 $ev_{Y^s}^s$,其中增加值的流入表示经济收益。对于它们之间的贸易隐含虚拟水为 $vw_{Y^r}^r$ 和 $vw_{Y^s}^s$, r 省份和 s 省份分别轮流扮演生产者和消费者的角色。

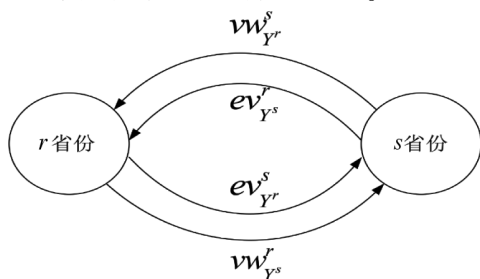


图2 省域间虚拟水和贸易增加值双边转移

基于受益与责任对等的公平共担原则,即 r 省份和 s 省份按照各自获得的经济收益来确定各自的水资源占用责任,将它们之间的虚拟水转移总量 ($vw_{Y^r}^r + vw_{Y^s}^s$) 分摊到这两个省份,结果如下式所示:

$$R^r = (vw_{Y^r}^r + vw_{Y^s}^s) \times \frac{ev_{Y^r}^r}{ev_{Y^r}^r + ev_{Y^s}^r} \quad (1)$$

$$R^s = (vw_{Y^r}^r + vw_{Y^s}^s) \times \frac{ev_{Y^s}^s}{ev_{Y^r}^r + ev_{Y^s}^s} \quad (2)$$

式中, R^r 、 R^s 分别表示 r 省份和 s 省份对它们间虚拟水转移总量所需承担的水资源占用责任。

进一步将式(1)和式(2)分解可得到 r 省份和 s 省份处于不同角色时的水资源占用责任,具体见下式:

$$R^r = R_p^r + R_c^r = vw_{Y^r}^r \times \frac{ev_{Y^r}^r}{ev_{Y^r}^r + ev_{Y^s}^r} + vw_{Y^s}^s \times \frac{ev_{Y^r}^r}{ev_{Y^r}^r + ev_{Y^s}^r} \quad (3)$$

$$R^s = R_p^s + R_c^s = vw_{Y^s}^s \times \frac{ev_{Y^s}^s}{ev_{Y^r}^r + ev_{Y^s}^s} + vw_{Y^r}^r \times \frac{ev_{Y^s}^s}{ev_{Y^r}^r + ev_{Y^s}^s} \quad (4)$$

式中, $R_p^r = vw_{Y^r}^r \times ev_{Y^r}^r / (ev_{Y^r}^r + ev_{Y^s}^r)$, $R_c^r = vw_{Y^s}^s \times ev_{Y^r}^r / (ev_{Y^r}^r + ev_{Y^s}^r)$ 分别表示 r 省份的生产侧和消费侧的虚拟水占用, $R_p^s = vw_{Y^s}^s \times ev_{Y^s}^s / (ev_{Y^r}^r + ev_{Y^s}^s)$, $R_c^s = vw_{Y^r}^r \times ev_{Y^s}^s / (ev_{Y^r}^r + ev_{Y^s}^s)$ 分别表示 s 省份的生产侧和消费侧的虚拟水占用。

将式(3)和式(4)推广到一般情况,即任意省份 k 在省际贸易中的对省域间虚拟水占用,如下式所示。

$$R_p^k = \sum_{t \neq k} vw_{Y^k}^t \times \frac{ev_{Y^k}^t}{ev_{Y^k}^t + ev_{Y^t}^k} \quad (5)$$

$$R_c^k = \sum_{t \neq k} vw_{Y^t}^k \times \frac{ev_{Y^k}^t}{ev_{Y^k}^t + ev_{Y^t}^k} \quad (6)$$

$$R^k = R_p^k + R_c^k \quad (7)$$

式中, R^k 、 R_p^k 、 R_c^k 分别表示 k 省份的虚拟水占用,生产侧虚拟水占用和消费侧虚拟水占用, $vw_{Y^k}^t$ 、 $vw_{Y^t}^k$ 分别表示 t 省份流向 k 省份和 k 省份流向 t 省份的隐含虚拟水, $ev_{Y^k}^t$ 、 $ev_{Y^t}^k$ 分别表示 t 省份流向 k 省份

和 k 省份流向 t 省份的隐含增加值。

式(5)、式(6)和式(7)即为公平共担原则下中国省际虚拟水占用分担模型,它表示每个省份在生产侧和消费侧的水资源占用,且水资源占用责任大小与其在省际贸易中获得的利益相当,经济获利越大,则应承担的虚拟水占用责任越多,获利越少,则相应的责任也越小。

由式(1)和式(2)可得出 r 省份和 s 省份在省际贸易中获得单位经济收益而需承担的水资源占用责任的计算公式如下:

$$\frac{R^r}{ev_{Y^r}^r} = \frac{vw_{Y^r}^s + vw_{Y^r}^r}{ev_{Y^r}^s + ev_{Y^r}^r} \quad (8)$$

$$\frac{R^s}{ev_{Y^s}^s} = \frac{vw_{Y^s}^r + vw_{Y^s}^s}{ev_{Y^s}^r + ev_{Y^s}^s} \quad (9)$$

可以看出, r 省份和 s 省份在省际贸易中获得单位经济收益而需承担的水资源占用责任相等, 即 $\frac{R^r}{ev_{Y^r}^r} = \frac{R^s}{ev_{Y^s}^s}$, 满足收益与责任对等原则, 从而消除了省域间虚拟水转移的不公平性, 进一步论证了该虚拟水占用分配方案的公平性。

(三) 虚拟水生态补偿方案

1. 虚拟水补偿份额确定

根据区域生态补偿的理论, 若一个地区的发展占用了其他地区的生态资源, 则该地区理应就占用部分向被占用地区进行补偿。因此, 本部分以虚拟水占用责任公平分担方案为基准, 通过与实际用水量比较确定需要进行补偿的虚拟水份额, 具体思路如图 3 所示。

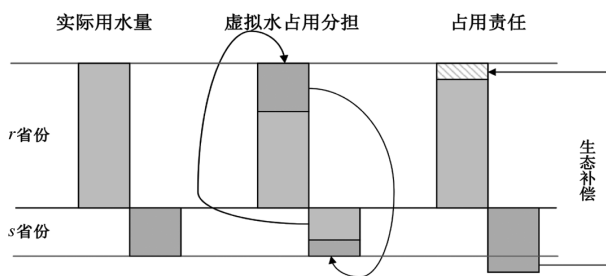


图3 跨区域虚拟水生态补偿

从图3可以看出, 针对 r 省份和 s 省份, 将它们的实际用水量与虚拟水占用公平共担方案对比, 可以得到 s 省份应该向 r 省份进行生态补偿的那部分虚拟水份额。

由上可知, r 省份和 s 省份的实际用水量分别为:

$$D^r = vw_{Y^r}^r, D^s = vw_{Y^s}^s \quad (10)$$

公平共担原则下 r 省份和 s 省份的虚拟水占用责任分别为:

$$R^r = (vw_{Y^r}^r + vw_{Y^r}^s) \times \frac{ev_{Y^r}^r}{ev_{Y^r}^s + ev_{Y^r}^r},$$

$$R^s = (vw_{Y^s}^r + vw_{Y^s}^s) \times \frac{ev_{Y^s}^s}{ev_{Y^s}^r + ev_{Y^s}^s} \quad (11)$$

假设如图3所示, 由 s 省份向 r 省份进行生态补偿, 则补偿份额可表示为:

$$Q^{sr} = D^r - R^r = R^s - D^s \quad (12)$$

即

$$Q^{sr} = vw_{Y^r}^r - (vw_{Y^r}^r + vw_{Y^r}^s) \times \frac{ev_{Y^r}^r}{ev_{Y^r}^s + ev_{Y^r}^r}$$

$$= (vw_{Y^r}^r + vw_{Y^r}^s) \times \frac{ev_{Y^r}^s}{ev_{Y^r}^s + ev_{Y^r}^r} - vw_{Y^r}^r$$

$$= \frac{vw_{Y^r}^r (ev_{Y^r}^s + ev_{Y^r}^r) - (vw_{Y^r}^r + vw_{Y^r}^s) ev_{Y^r}^r}{ev_{Y^r}^s + ev_{Y^r}^r}$$

$$= \frac{vw_{Y^r}^r ev_{Y^r}^s - vw_{Y^r}^s ev_{Y^r}^r}{ev_{Y^r}^s + ev_{Y^r}^r} \quad (13)$$

2. 虚拟水补偿标准确定

虚拟水补偿标准可以用单位虚拟水的经济价值来衡量, 因此本文根据受补偿省份的自来水价格来确定该省份的补偿标准。以中国水网 (<https://www.h2o-china.com/price/>) 上 30 个省份的省会城市的自来水价格作为各省的水价。自来水价格分为 3 类, 即居民 (第一阶梯、第二阶梯、第三阶梯)、非居民和特种行业。考虑到特种行业的用水量相对较少, 本文只以居民和非居民自来水价格确定当地水价。具体来说, 对分阶梯居民用水价格求平均值, 得到居民用水的平均水价, 然后再与非居民用水价格求均值, 并将其作为当地省份的平均水价 (p^r)。

3. 补偿方案

在中国省际虚拟水补偿份额和补偿标准确定的基础上, 本文制定中国省域间虚拟水补偿方案。

由上可知, s 省份向 r 省份进行生态补偿的那部分虚拟水份额为:

$$Q^{sr} = \frac{vw_{Y^r}^r ev_{Y^r}^s - vw_{Y^r}^s ev_{Y^r}^r}{ev_{Y^r}^s + ev_{Y^r}^r} \quad (14)$$

r 省份的虚拟水补偿标准为 p^r , 则可计算出 s 省份向 r 省份生态补偿额为:

$$C^{sr} = p^r \times Q^{sr} = p^r \times \frac{vw_Y^r ev_Y^s - vw_Y^s ev_Y^r}{ev_Y^s + ev_Y^r} \quad (15)$$

三、中国省际虚拟水占用责任分担方案

(一) 虚拟水占用责任时间变化趋势分析

利用式(5)、式(6)和式(7)计算公平共担原则下 2002 年、2007 年、2012 年和 2015 年各省份的虚拟水占用责任, 计算结果如表 1 所示。

表 1 2002 年、2007 年、2012 年和 2015 年各省份在公平共担原则下虚拟水占用责任

单位: 亿 m ³									
省份	2002	2007	2012	2015	省份	2002	2007	2012	2015
北京	42.7	37.6	68.1	47.2	河南	46.9	65.0	122.6	120.4
天津	21.6	25.1	38.6	40.9	湖北	46.5	67.1	42.5	70.3
河北	93.6	117.5	182.8	99.0	湖南	58.7	82.2	120.0	103.1
山西	18.8	15.8	31.0	39.9	广东	67.2	136.6	97.3	129.8
内蒙古	48.4	66.3	108.6	83.7	广西	41.5	75.2	89.7	72.8
辽宁	44.7	39.4	98.9	68.8	海南	15.6	11.9	31.5	26.2
吉林	51.7	46.4	48.5	49.5	重庆	36.4	25.8	56.9	44.9
黑龙江	64.9	87.3	178.9	152.6	四川	34.7	39.9	51.0	60.5
上海	46.6	80.7	92.9	89.8	贵州	21.3	24.2	39.2	37.8
江苏	70.8	125.4	229.4	245.3	云南	25.8	31.2	50.2	36.7
浙江	71.2	69.0	111.0	102.1	陕西	26.0	63.7	70.9	65.1
安徽	91.2	67.8	154.9	125.0	甘肃	13.1	16.6	45.8	62.4
福建	24.3	33.9	41.3	65.0	青海	4.7	3.1	5.7	9.1
江西	44.7	38.2	81.8	83.1	宁夏	10.2	9.5	12.3	13.4
山东	68.5	103.3	107.7	106.0	新疆	90.4	82.8	172.4	53.9

从表 1 可以看出, 大部分省份公平共担原则下的虚拟水占用责任在 2002—2015 年呈现出“先上升、后下降”的趋势。如河北从 2002 年的 93.6 亿 m³ 增长到 2012 年的 182.8 亿 m³, 然后在 2015 年下降至 99.0 亿 m³; 黑龙江省从 2002 年的 64.9 亿 m³ 增长到 2012 年 178.9 亿 m³, 然后在 2015 年下降至 152.6 亿 m³。这与中国省际贸易隐含虚拟水总量的变化趋势保持一致。但是, 一些省份的变化趋势有所不同, 它们的虚拟水占用责任在 2002—2015 年始终保持上升趋势。如天津市从 2002 年的 21.6 亿 m³ 单调递增至 2015 年的 40.9 亿 m³; 福建省从 2002 年的 24.3 亿 m³ 单调递增至 2015 年的 65.0 亿 m³。这说明这些省份在 2015 年从省际贸易中获得经济收益比重较 2012 年有所上升, 且贸易产品偏向于高耗水产品。

(二) 虚拟水占用责任区域差异分析

从区域角度来看, 中国省域间虚拟水占用责任差异明显。2002 年、2007 年、2012 年和 2015 年公平共担原则下省域虚拟水占用责任比重情况如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 江苏省的虚拟水占用责任最大, 2015 年的比重达到 10.6%, 其次为黑龙江省 (6.6%, 2015 年)、广东省 (5.6%)、安徽省 (5.4%)、

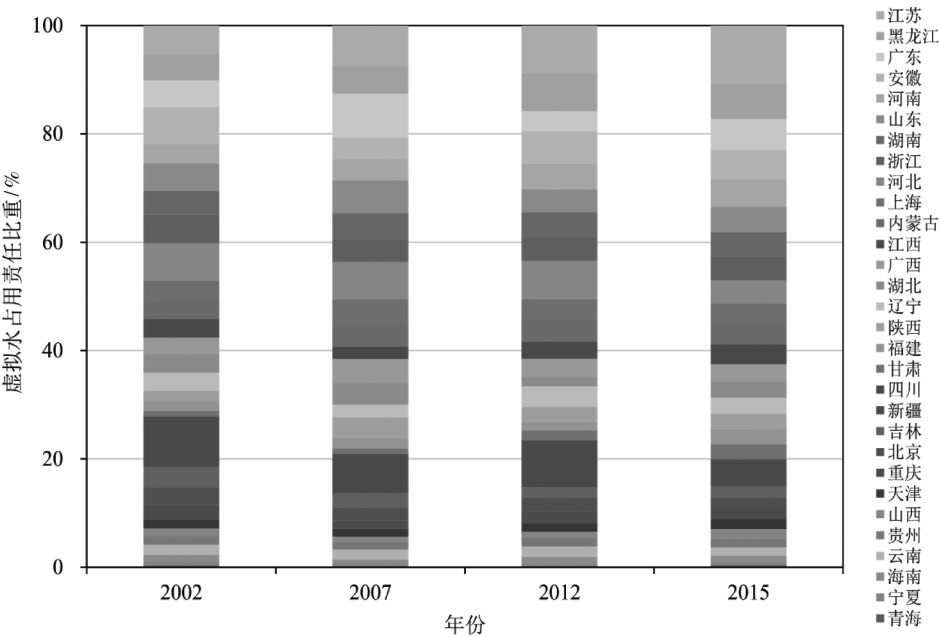


图 4 2002 年、2007 年、2012 年和 2015 年省域虚拟水占用责任比重结果

河南省(5.2%)、山东省(4.6%)、湖南省(4.5%)、浙江省(4.4%)、河北省(4.3%)、上海市(3.9%),这些省份一般都是中国省际贸易的主要参与者,受水资源禀赋影响,贸易进出口产品都与水资源密切相关,因而导致这些省份的虚拟水占用责任较大。这 10 个省份的虚拟水占用责任合计占 55.3%,而最小的 10 个省份的合计比重只有 15.0%,体现出中国省域在虚拟水占用责任上的差异明显。

(三)虚拟水占用责任结构分析

基于公平共担原则下的中国省际虚拟水占用责任分担模型,进一步可将各省份的虚拟水占用责任分解为生产侧责任和消费侧责任,如图 5 所示。从图 5 中可以看出,有省份的生产侧责任显著高于消费侧,如 2015 年江苏省的生产侧责任(166.1 亿 m^3)是其消费侧(79.2 亿 m^3)的 2.1 倍,黑龙江的生产侧责任(123.6 亿 m^3)是消费侧责任(29.0 亿 m^3)的 4.3 倍,类似的还有新疆、内蒙古、江西、广西、甘肃等省份的水资源丰富或经济相对欠发达省份。还有省份的生产侧责任显著低于消费侧,如 2015 年广东省的消费侧责任(112.5 亿 m^3)是其生产侧责任(17.2 亿 m^3)的 6.5 倍,北京市的消费侧责任(39.6 亿 m^3)是其生产侧责任(7.6 亿 m^3)的 5.2 倍,类似的还有山东、上海、重庆、天津等省份的水资源欠缺或经济较发达。实际上,中国省域在虚拟水占用责任方面的差异主要是由国内价值链分工差异和水资源禀赋差异所导致的。南方丰水地区或经济欠发达地区位于价值链上游,主要输出高耗水的农业初级产品,导致生产侧的虚拟水占用责任较大;北方缺水地区或经济较为发

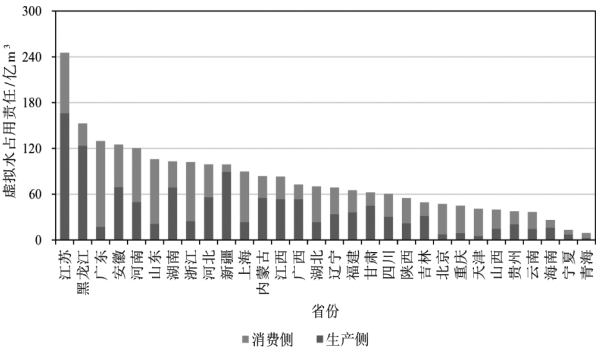


图 5 2015 年公平共担原则下的中国省域虚拟水占用责任结构

达的地区,主要通过省际贸易来满足其对高耗水产品的需求,因而导致消费侧的虚拟水占用责任较大。

四、中国省际虚拟水生态补偿方案

(一)虚拟水生态补偿份额确定

本文以虚拟水占用责任公平分担方案为基础,通过与实际用水量比较确定需要进行补偿的虚拟水份额,利用式(13)计算 2002 年、2007 年、2002 年和 2015 年中国省域间虚拟水补偿份额,如图 6 所示。图 6(a)、图 6(b)、图 6(c)、图 6(d)分别表示 2002 年、2007 年、2002 年和 2015 年中国省域间虚拟水补偿份额,每张图中包含 435 个不同深浅灰色方格,其余 465 个白色方格无数据,每一个灰色方格表示对应的纵向省份对横向省份的虚拟水补偿份额,灰色深浅表示补偿份额的大小。

从图 6 可以看出,新疆受其他省份生态补偿的虚拟水份额始终最大,2002 年、2007 年、2002 年和 2015 年受补偿份额分别为 54.6 亿、82.3 亿、209.9 亿、240.7 亿 m^3 ,而且新疆对其他省份的虚拟水生态补偿份额几乎为 0。这主要是因为新疆的省际贸易出口商品主要是高耗水、低附加值的农业初级产品,而进口的基本为低耗水、高附加值的产品,从而导致新疆在省际贸易中的虚拟水占用责任较小,同时由于其实际用水量巨大,最终使得新疆需要受补偿的虚拟水份额较大。类似的还有黑龙江、安徽、广西等省份水资源丰富的欠发达地区。这 3 个省份在 2015 年需要补偿的虚拟水省份分别为 73.3 亿、44.4 亿、45.7 亿 m^3 。

另一方面,从补偿方的角度来看,广东需要对其他省份进行补偿的虚拟水份额最大(见图 6),2002 年、2007 年、2002 年和 2015 年需要对外补偿份额分别为 23.7 亿、74.1 亿、50.2 亿、87.9 亿 m^3 ,而它应该受到生态补偿的虚拟水份额相对来说很小。这主要是因为广东是经济较为发达的地区,GDP 总量高,产业结构以低耗水、高附加值的产品为主;人口众多、消费水平较大,通过省际贸易从其他省份输入了大量的高耗水、低附加值产品满足巨大的消费需求,因此广东在省际贸易中对外补偿的虚拟水份额远远大于其应受补偿的部分。

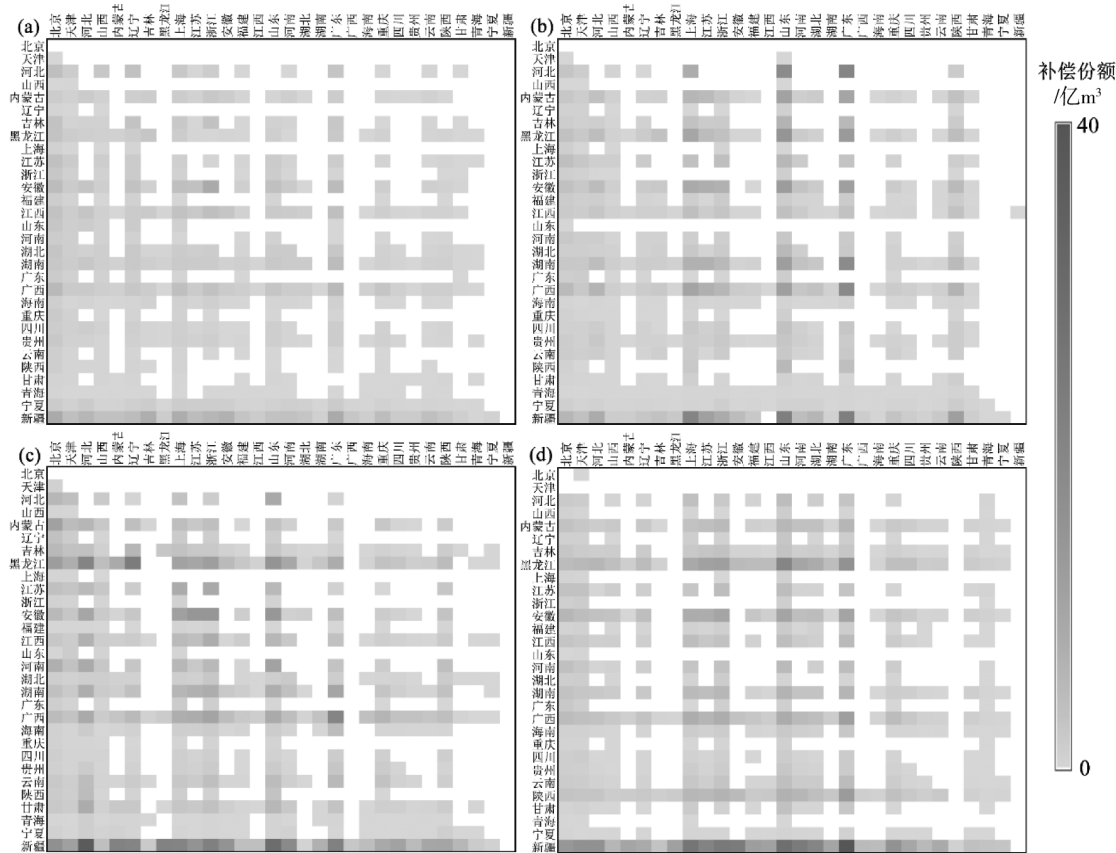


图6 2002年、2007年、2012年和2015年中国省域间虚拟水补偿份额

同样地,北京、上海、浙江、山东、河南的对外补偿份额也较为可观,在2015年分别达到33.7亿、52.2亿、55.6亿、74.7亿、36.5亿 m^3 。而且,对于北京、山东、河南等缺水省份来说,水资源短缺也是其对外补偿份额较大的重要原因,因为它们相当一部分用水需求需要通过虚拟水满足,从而导致虚拟水占用责任较大,在实际直接用水量较小的情况下,则需要对其他省份虚拟水进行补偿。

最后,从省对省的补偿来看,广东对新疆的虚拟水补偿份额最大,2002年、2007年、2002年和2015年的补偿份额分别为4.3亿、13.7亿、13.0亿、39.0亿 m^3 。除此以外,浙江→新疆、上海→新疆、山东→新疆等省对省的虚拟水生态补偿份额较大,2015年分别达到17.3亿、19.2亿、22.7亿 m^3 。

(二)虚拟水生态补偿方案

本文在省对省的虚拟水补偿份额确定的基础上,结合虚拟水补偿标准(受补偿省份的平均水价),利用式(15)可以计算省对省的虚拟水补偿额

度。2015年中国30个省域间的虚拟水补偿额如图7所示。图7共有435个灰色方格,表示30个省份之间的补偿关系,灰色方格的颜色深浅表示省对省补偿金额,补偿方向为横向省份对纵向省份进行补偿。

从省对省的补偿来看,广东→新疆、上海→新疆、浙江→新疆、山东→新疆、河南→新疆的虚拟水补偿额最大,分别达到124.7亿元、61.5亿元、55.4亿元、72.7亿元、51.4亿元,而上海→青海、北京→山东、天津→青海、河南→福建、海南→内蒙古的虚拟水补偿额最小,分别为67.6万元、183.2万元、374.6万元、379.5万元、402.6万元。补偿金额的大小受多方面因素的影响,贸易疏密程度、产业结构差异程度、水资源丰缺程度是主要原因。但是对不同省对省补偿来说,主导因素有所差异,如对于广东→新疆、上海→新疆来说,产业结构差异较大是主导因素,新疆水资源充沛、产业结构以农业为主,为经济发达地区输送高耗水、低附加值的农业初级产品,而从这些地区进口低

耗水、高附加值的高新技术产品,导致新疆与发达省份间的虚拟水不公平性较大,因而相应的补偿金额也较大。而对于山东→新疆、河南→新疆来说,水资源禀赋差异是主要原因,山东、河南等北方省份水资源短缺,对于高耗水产品的需求依赖从其他省份进口,新疆为它们输送了大量的高耗水、低附加值的农产品,大量的虚拟水从新疆流向这些缺水且人口众多的省份,因而也导致补偿金额可观。对于上海→青海、天津→青海、海南→内蒙古来说,它们补偿金额较小的原因在于贸易不够紧密,虚拟水联系较弱,因而虚拟水补偿金额也较小。

从补偿方向来看,总体上呈现出,经济发达、水资源短缺的省份向经济落后、水资源丰沛的省份进行虚拟水补偿。如北京、天津、上海、浙江、山东、广东等省份是主要的对外补偿省份,而吉林、黑龙江、安徽、广西、江西、新疆等省份是主要的受补偿省份(见图7)。为此,计算2015年中国30个省份的对外补偿额和受补偿额,计算结果如图8所示。从图8可以看出,中国省域间的虚拟水补偿情况存在明显差异。新疆、黑龙江、内蒙古、吉林是受补偿金额最大的省份,它们需要其他省份进行补偿的金额分别为770.1亿元、318.7亿元、100.0

亿元、99.7亿元,合计占全国省际虚拟水补偿总额的63.3%。另外,广东、山东、浙江、上海是对外补偿额最大的省份,分别达到293.7亿元、254.5亿元、185.0亿元、172.8亿元,合计占全国省际虚拟水补偿总额的42.4%。而对于安徽、河南、河北等省份来说,对外补偿额和受补偿额相当,这主要与它们的产业结构和水资源禀赋有关,这些地区经济较为落后又比较缺水,它们一方面为发达地区提供低附加值产品,一方面又从丰水地区的省份进口高耗水产品,从而导致它们的虚拟水流出(入)处于较为平衡状态,因而对外补偿额和受补偿额相当。

五、结论与政策启示

(一) 结论

本文在“谁受益,谁承担”的公平性原则下,以贸易利益为分配因子,构建了中国省际虚拟水占用责任公平配置模型,分配各省域对中国省际虚拟水占用的环境责任,并在此基础上,通过与实际用水量比较确定需要进行补偿的虚拟水份额,再结合各省域的水资源价格确定的生态补偿标准,构建跨区域虚拟水生态补偿模型,实施跨省域的中国省际虚拟水生态补偿方案,实现省域间点对点、精准的虚拟水生态补偿。

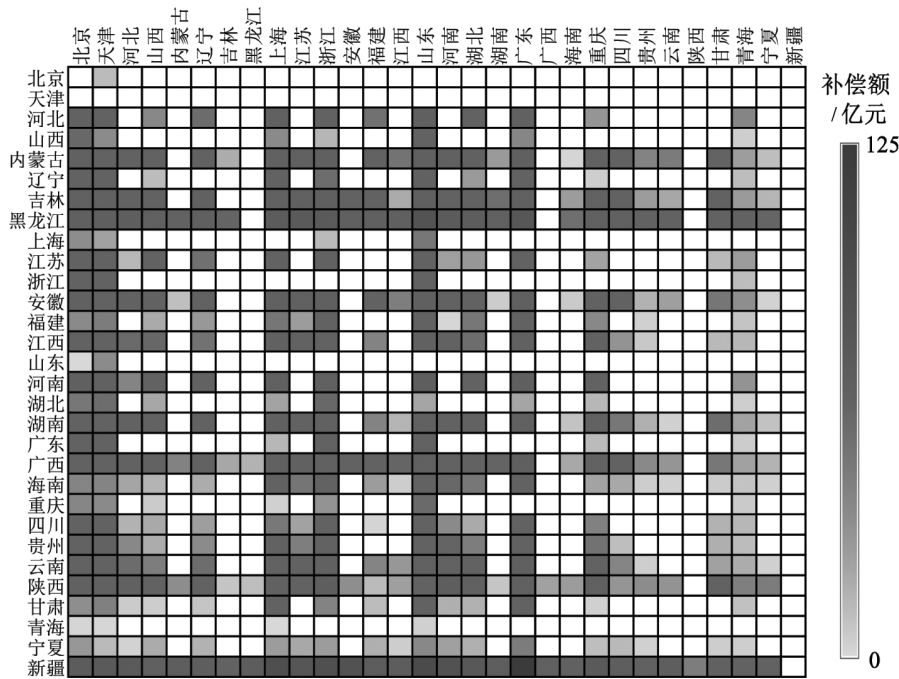


图7 2015年中国省域间虚拟水补偿额

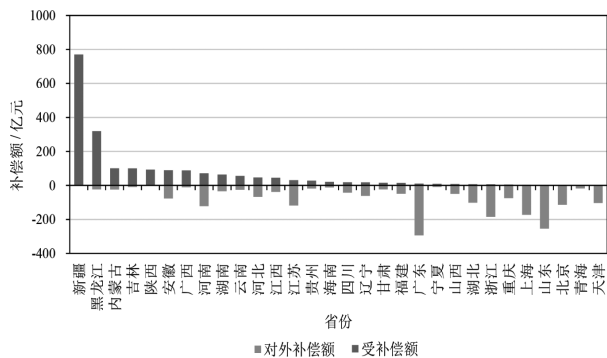


图8 2015年中国省域虚拟水对外补偿额及受补偿额

第一,从时间变化来看,河北、黑龙江等大部分省份公平共担原则下的虚拟水占用责任在2002—2015年呈现出“先上升、后下降”的趋势,这与中国省际贸易隐含虚拟水总量的变化趋势保持一致。但是,天津、福建等省份的变化趋势有所不同,它们的虚拟水占用责任在2002—2015年始终保持上升趋势,这说明这些省份在2015年从省际贸易中获得经济收益比重较2012年有所上升,且贸易产品偏向于高耗水产品。

第二,从区域差异来看,江苏、黑龙江、广东、安徽、河南、山东等贸易大省的虚拟水占用责任较大,受水资源禀赋影响,贸易进出口产品都与水资源密切相关,因而导致这些省份的虚拟水占用责任较大。不过,这些省份的虚拟水占用责任结构有所差异,江苏、黑龙江、新疆等水资源丰富省份的生产侧责任显著高于消费侧,而北京、山东、天津等水资源欠缺省份的生产侧责任显著低于消费侧。

第三,从虚拟水补偿来看,经济发达、水资源短缺的省份向经济落后、水资源丰沛的省份进行虚拟水补偿。如北京、天津、上海、浙江、山东、广东等是主要的对外补偿省份,而吉林、黑龙江、安徽、广西、江西、新疆等是主要的受补偿省份。同时,为了保障虚拟水生态补偿的有效实施,需要构建完善的虚拟水生态补偿运作模式、推动虚拟水生态补偿方式与融资渠道多元化、建立完善的虚拟水生态补偿法律体系、建立专门的虚拟水生态补偿机构、完善虚拟水生态补偿监督机制。

(二)政策启示

中国省际隐含虚拟水在中国水资源消耗中占据重要地位,我国水资源的南北分布不平衡,导致

虚拟水转移引起的南北方水资源压力转移差异显著。南方向北方转移的水资源压力是北方向南方转移的7倍多,进一步加剧了北方地区的水资源短缺问题。在本文研究结果的基础上,从宏观区域层面和微观企业层面两个角度就提高水资源利用效率、促进虚拟水合理转移及保证虚拟水生态补偿有效运行等方面提出以下政策建议。

1. 宏观区域层面

(1) 倡导区域间有效的虚拟水转移

贸易引致的虚拟水转移进一步加剧了我国水资源的南北不均程度,目前的虚拟水贸易没有起到改善北方水资源短缺的作用,因而需要倡导实施有效的虚拟水战略,通过虚拟水转移促进水资源的优化配置。我国幅员辽阔,区域间资源禀赋、产业结构及经济发展水平等差异大,北方地区拥有全国大部分的耕地资源,却仅占全国20%的水资源,而南方地区占据约80%的水资源,却仅拥有小部分的耕地资源。因此,北方地区是我国的粮食主产区,大量的粮食从水资源短缺的北方地区输送到水资源丰富的南方地区,导致虚拟水从北方流向南方。虚拟水战略主要目的是促进水资源的优化配置,缓解缺水地区的水资源压力,提供持续的生态服务,满足国家水安全需求。因此,中央政府要倡导实施有效的虚拟水战略,保证国家水生态安全。

(2) 改进区域间产业及贸易结构

省域间的虚拟水净转移和增加值净转移存在显著的不公平现象,这主要是因为区域间产业结构差异所导致的。经济发达地区通过高附加值、低耗水的高新技术产品及生产性服务业获得了贸易上的顺差,经济落后地区由于产业结构劣势,主导产业产品属于低附加值、高耗水的产品,因此在贸易过程中导致贫水地区向富水地区虚拟水净流出,加剧了贫水地区水资源的短缺程度。因此,改进区域间产业及贸易结构,引导虚拟水从丰水地区流向缺水地区,实现全国层面的水资源科学利用。

(3) 完善省际虚拟水生态补偿机制

本文给出了中国省际虚拟水生态补偿方案,

确定了省与省之间的补偿金额,但是如何有效落地实施需要进一步完善省际虚拟水生态补偿机制。因此,通过丰富虚拟水补偿方式,并建立配套的法律体系、执行机构、监督机制来完善省际虚拟水生态补偿机制,保证虚拟水生态补偿的有效实施。

2. 微观企业层面

(1) 提高水资源利用效率

生产用水强度的下降是抑制中国省际虚拟水增长的最主要因素。具体来说,针对农业用水,需要大力推进工程节水、生物节水、农艺节水、推进高效节水灌溉和覆盖保墒减少土壤表面水蒸发量。针对工业用水,高耗水行业企业要积极推进工业节水改造、良性水循环系统,来提高水资源利用效率。

(2) 推广水足迹标签制度

虚拟水通过产业链联系在不同地区和不同行业之间发生了转移,不仅要产品生产过程中的直接耗水量,还要从产业链的角度来评价行业水足迹。因此,水足迹标签制度是利用消费行为影响生产行为从而提高用水效率的一种方式,促进用水产品节水生产企业技术和产品质量提升。为此,大力推广节水标签和水效标识制度,引导消费行为,并倡导在各行业内组建企业联盟,加强对供应商的管理以降低各个环节的水足迹,从而倒逼生产企业提高节水技术,减少水资源消耗。

(3) 倡导合理健康的饮食结构

消费结构对中国省际贸易隐含虚拟水的影响从促进作用转变为抑制作用。因此,需要继续改善居民饮食结构,进一步发挥其节水效应,同时也有助于提升居民饮食健康。目前,中国居民的饮食结构不太健康,肉类、脂肪等食品的人均消费已经超出中国居民膳食均衡的上限,而且肉食在饮食结构中的比重还有继续保持扩大的趋势。因此,积极倡导健康饮食,餐饮企业要营造出以勤俭节约为荣、以铺张浪费为耻的浓厚社会氛围,减少居民食品消费引致的水资源浪费。

参考文献:

[1]倪琪,徐涛,李晓平,等.跨区域流域生态补偿标准核算——基于成本收益双视角[J].长江流域资源与环境,2021,30(1):97-110.

[2]CRANFORD M, MOIRATO S. Credit-based payments for ecosystem services: evidence from a choice experiment in Ecuador[J]. World development, 2014, 64: 503-520.

[3]ESCOBAR M M, HOLLAENDER R, WEFER C P. Institutional durability of payments for watershed ecosystem services: lessons from two case studies from Colombia and Germany[J]. Ecosystem services, 2013, 6: 46-53.

[4]PAGIOLA S. Payments for environmental services in Costa Rica[J]. Ecological economics, 2008, 65(4): 712-724.

[5]王克强,李国军,刘红梅.中国农业水资源政策一般均衡模拟分析[J].管理世界,2011(9):81-92,188.

[6]刘红梅,李国军,王克强.中国农业虚拟水国际贸易影响因素研究——基于引力模型的分析[J].管理世界,2010(9):76-87,187.

[7]刘红梅,李国军,王克强.中国农业虚拟水“资源诅咒”效应检验:基于省际面板数据的实证研究[J].管理世界,2009(9):69-79,90.

[8]王爱敏,葛颜祥,接玉梅.水源地保护区生态补偿主客体界定及其利益诉求研究[J].山东农业大学学报(社会科学版),2017,19(3):35-41,119.

[9]檀勤良,韩健,刘源.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[J].中国软科学,2021(6):144-152.

[10]王西琴,高佳,马淑芹,等.流域生态补偿分担模式研究——以九洲江流域为例[J].资源科学,2020,42(2):242-250.

[11]GUAN X, LIU W, CHEN M. Study on the ecological compensation standard for river basin water environment based on total pollutants control[J]. Ecological indicators, 2016, 69: 446-452.

[12]石常峰,王彦滢,吴敏.水生态补偿研究进展与展望[J].水利经济,2021,39(3):22-29,86.

[13]兰绍清,石成春,汤丽娟,等.基于生态保护红线制度的流域生态补偿研究——以永泰县大樟溪流域生态补偿为例[J].福建论坛(人文社会科学版),2016(12):194-199.

[14]孟雅丽,苏志珠,马杰,等.基于生态系统服务价值的汾河流域生态补偿研究[J].干旱区资源与环境,2017,31(8):76-81.

[15]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):110-119.

[16]张国兴,徐龙,千鹏霄.南水北调中线水源区生态补偿测算与分配研究[J].生态经济,2020,36(2):160-166.

- [17]张贵,齐晓梦. 京津冀协同发展中的生态补偿核算与机制设计[J]. 河北大学学报(哲学社会科学版),2016,41(1):56-65.
- [18]李芬,朱夫静,翟永洪,等. 基于生态保护成本的三江源区生态补偿资金估算[J]. 环境科学研究,2017,30(1):91-100.
- [19]张化楠,葛颜祥,接玉梅. 生态认知、生计资本对流域居民生态补偿支付意愿的影响研究[J]. 农业经济与管理,2019(3):61-69.
- [20]寇青青,运剑苇,刘淑婧,等. 南水北调中线工程生态补偿计算研究[J]. 西南大学学报(自然科学版),2020,42(1):112-117.
- [21]钟绍卓. 洱海流域水资源价值核算和生态补偿机制研究[D]. 上海:上海交通大学,2019.
- [22] ENGEL S, PAGIOLA S, WUNDER S. Designing payments for environmental services in theory and practice: an overview of the issues[J]. Ecological economics, 2008, 65(4): 663-674.
- [23] PASCUAL U, CORBERA E, MURADIAN R, et al. Payments for environmental services: reconciling theory and practice[J]. Ecological economics, 2010, 69(6): 1202-1302.
- [24]郑云辰,葛颜祥,接玉梅,等. 流域多元化生态补偿分析框架:补偿主体视角[J]. 中国人口·资源与环境,2019,29(7):131-139.
- [25]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.
- [26]景守武,张捷. 新安江流域横向生态补偿降低水污染强度了吗? [J]. 中国人口·资源与环境,2018,28(10):152-159.
- [27]杨荣金,张一,李秀红,等. 创新永定河流域生态补偿机制,助力京津冀协同发展[J]. 生态经济,2019,35(12):134-138.
- [28]刘桂环,王夏晖,文一惠,等. 以生态补偿助推新时期流域上下游高质量发展[J]. 环境保护,2019,47(21):11-15.
- [29] DAVIS A I. Ecosystem services and the value of land[J]. Duke environmental law & policy forum, 2010, 20: 339-384.
- [30]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):36-44.
- [31]朱启荣,高敬峰. 中国对外贸易虚拟水问题研究——基于投入产出的分析[J]. 中国软科学,2009(5):40-45,88.
- [32]朱启荣. 中国外贸中虚拟水与外贸结构调整研究[J]. 中国工业经济,2014(2):40-45,88.
- [33]陈惠雄. 工业化过程中的人地关系演化与生态悖论[J]. 中国工业经济,2009(8):26-36.
- [34]王海林,黄晓丹,赵小凡,等. 全球气候治理若干关键问题及对策[J]. 中国人口·资源与环境,2020,30(11):26-33.

(本文责编:王延芳)