

文章编号: 1674 - 6139(2015)09 - 0020 - 05

基于投入产出分析的虚拟水研究综述及展望

马忠 张小霞

(西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 将国内外基于投入产出模型的虚拟水研究进行系统概括, 认为按研究层面可以归纳为区域之间的虚拟水贸易和产业间部门用水关联两方面, 并指出: (1) 目前基于投入产出分析技术的虚拟水研究基本建立在价值型投入产出模型的基础上, 实际上将产业虚拟水替代了原本产品虚拟水的概念。(2) 目前针对工业品、服务品的虚拟水量化研究不足, 并未独立研究非农产品虚拟水量化时的差异性。最后文章提出产业生态学中近年来发展的混合生命周期评价方法(Hybrid life - cycle assessment, HLCA)。

关键词: 虚拟水; 价值型投入产出模型; 工业品; 服务品; HLCA

中图分类号: X32

文献标志码: A

Review and Prospects of Virtual Water Based on input - output Analysis

Ma Zhong, Zhang Xiaoxia

(College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu)

Abstract: Researches on virtual water based on input - output model at home and abroad are generalized systematically. It can be divided into two aspects according to the research level. One part is about virtual water trade among regions; the other is about department water connection between industry. It is pointed out that 1) At present, input - output analysis of virtual water are mainly established on the basis of value input - output model, the original concept of product virtual water are replaced by the concept of industry virtual water actually. 2) Applying input - output analysis for virtual water quantification of industrial products and service products is lacking, and the differences in the virtual water study of non - agricultural products is not studied separately. Therefore, the hybrid life cycle assessment(HLCA) is proposed.

Key words: virtual water; value input - output model; industrial products; service product; HLCA

前言

虚拟水的概念由 Tony Allan 于 1993 年首先提出, 是指在生产商品和服务过程中所需的水资源数量^[1]。程国栋于 2003 年在国内首次明确提出了虚拟水的概念^[2]。目前, 基于虚拟水概念的水足迹、虚拟水战略及水资源管理的研究已经引起国内外广泛关注, 成为研究热点之一。

产品虚拟水的量化是虚拟水研究的前提和基

础, 是虚拟水研究的出发点。

国际流行的传统虚拟水测算方法主要针对农牧产品, 通过彭曼公式, 按生产树或逐级产品投入比例的方法来实现虚拟水的量化。然而, 由于渠系渗漏、蒸发等原因, 在干旱区基于彭曼公式计算的农作物虚拟水含量要远小于实际用水量。此外, 该方法仅能计算几种农产品的虚拟水含量, 不能计算其他耗水相对较少的工业和服务业产品的虚拟水含量。

相比之下, 基于经济系统的投入产出模型在宏观层面上面向整个经济系统, 有效地克服了传统虚拟水测算方法的不足, 可用于研究包括农产品、工业品和服务产品在内的所有商品的虚拟水贸易和消费量^[3], 从宏观的角度把握整个国民经济系统中各种产品虚拟水间的流动关系, 具有直观、准确度高的特

收稿日期: 2015 - 05 - 13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41061050; 41461115)

作者简介: 马忠(1968 -), 男, 副教授, 主要从事投入产出分析及生态经济方面的研究。

通讯作者: 张小霞

点^[4]。近年来,基于投入产出技术的虚拟水研究纷纷涌现,已成为水资源投入产出分析研究的热点,仅仅基于投入产出分析技术的虚拟水贸易国内研究文献在 2005 年-2014 年之间已达 40 篇。

投入产出分析最早是由美国经济学家,诺贝尔经济学奖获得者里昂惕夫(Leontief)于 20 世纪 30 年代提出,主要通过编制投入产出表及建立相应的数学模型反映经济系统各个部门(产业)之间的相互关联。近年来,水资源投入产出模型以其结构化数据和独特的关联分析优势被越来越多地运用在虚拟水研究当中^[3]。

投入产出表按核算单位可分为价值型和实物型,所有的投入产出分析都必须以投入产出表为基础,局限于投入产出表数据来源,目前绝大部分基于投入产出的虚拟水研究都是在价值型投入产出模型的基础上。

本文从价值型投入产出模型入手对国内外基于投入产出分析的虚拟水研究进展进行归纳总结,并讨论该方法研究虚拟水的特征与发展前景。

1 国内外基于投入产出分析的虚拟水研究综述

1.1 基于价值型投入产出模型的虚拟水研究

按其研究层面可归纳为地区间虚拟水流动(虚拟水贸易)和产业间虚拟水流动(部门用水关联)两方面:

1.1.1 地区间虚拟水流动-虚拟水贸易

表 1 近年基于价值型投入产出模型的国家间虚拟水贸易研究案例

时间	研究地点	研究方法	研究结果	资料来源
2005	日本	基于投入产出表的因素分解分析	制成品的出口与虚拟水之间的关系	[5]
2007	西班牙	价值型水资源投入产出模型	进出口贸易中的虚拟水量	[6]
2009	中国	价值型水资源投入产出模型	虚拟水的进出口贸易量及水足迹研究	[7]
2011	中国	价值型水资源投入产出模型	2002、2005 和 2007 年的进出口虚拟水量	[8]
2014	中国	区域间投入产出模型	中国与各国虚拟水贸易的空间分布格局	[9]

1.1.1.2 国家内部地区间的虚拟水贸易

近年来,基于价值型投入产出模型在国家内部地区间的虚拟水贸易研究案例数不胜数。表 2 列出了其中的若干代表性研究。Guan D. 和 Hubacek 运用扩展的区域投入产出模型计算了中国南北方之间的虚拟水流动,通过虚拟水流动评估

地区间的虚拟水流动通过地区间的虚拟水贸易体现出来,从区域上来划分,本文将地区间的虚拟水贸易分为国家间和国家内部地区间两部分来进行综述。

1.1.1.1 国家间的虚拟水贸易

表 1 列出了近年基于价值型投入产出模型在国家间虚拟水贸易方面的主要研究成果。Kondo 突破国界,在日本投入产出表和因素分解分析方法的基础上,将虚拟水出口变化分解为直接用水系数变化、间接用水系数变化和出口量变化,研究日本的物质出口与水资源之间的关系,为日本的贸易策略提出建议^[5]。荷兰学者 Dietzenbacher 利用投入产出模型框架研究西班牙安达卢西亚地区的虚拟水贸易,认为该国是水资源净出口国,通过减少农产品输出,可以有效地改变这一状况^[6]。在国内,赵旭等以 2002 年投入产出表为依据来计算中国的国家水足迹,在此基础上对部门间的虚拟水贸易进行评估,验证了中国就整个国民部门而言是一个虚拟水净出口国,且出口主要集中在轻工业和服务业上^[7]。和夏冰等也运用投入产出分析方法计算了中国的进出口虚拟水量,同样得到中国是一个虚拟水净出口国,并且主要出口到美洲、欧洲和亚洲地区^[8]。张晓宇等以世界水资源投入产出模型为基础,研究了中国与各国的虚拟水贸易量及主要流动方向,揭示了中国虚拟水贸易的空间分布格局,结果表明中国一直为虚拟水净出口国,且主要向发达国家出口^[9]。

了当前区域间的贸易结构及其对水消费和污染的影响。研究表明,中国目前的贸易结构与水资源优化配置的目标是相悖的^[10]。Lenzen 从生产者和消费者两个角度出发,运用八区域的区域间投入产出模型对澳大利亚 Victoria 地区的虚拟水流动进行量化分析,而从两个角度出发得到的结果却

是截然不同的^[11]。王梓元、黄凯等利用改进的投入产出模型计算了北京的水足迹和虚拟水贸易,结果证实北京是一个虚拟水净进口地区,此外,水足迹的计算结果显示北京在用水效率方面的改进要优于中国其他省份^[12]。Anadon L. D. 和 Chao 基于跨区域的投入产出模型量化了中国省际水平上

的虚拟水贸易和消费的水足迹,结果表明,体现在国内贸易中的虚拟水是中国国际出口中虚拟水的两倍之多^[13]。目前,最新的研究成果是谭圣林、邱国玉等人结合单区域投入产出模型(SRIO)和多区域投入产出模型(MRIO)研究广东省的虚拟水消费与贸易^[14]。

表2 近年基于价值型投入产出模型的国家内部地区间的虚拟水贸易研究案例

时间	研究地点	研究方法	研究结果	资料来源
2007	中国南北方	扩展的区域投入产出模型	南北方之间的虚拟水流动	[10]
2009	澳大利亚 Victoria	区域间投入产出模型	该地区的虚拟水流动	[11]
2013	北京	改进的投入产出模型	水足迹与虚拟水贸易研究	[12]
2014	中国	跨区域的投入产出模型	省际水平上的虚拟水贸易及水足迹研究	[13]
2014	广东省	SRIO 与 MRIO 相结合	虚拟水消费与贸易	[14]

1.1.2 产业间虚拟水流动-部门用水关联特征分析

国内外利用价值型投入产出模型对区域经济系统内部产业间的虚拟水研究,较为常见的是通过直接或完全用水系数以及关联度来分析判别部门用水特性。但 Hassan 指出仅利用直接用水系数与综合利用完全用水系数、关联度等指标对产业用水特性进行分析所得的结果存在较大差异,建议评价部门用水特性时应力求全面^[15]。西班牙学者 Rosa Duarte 等在投入产出假设抽取法(HEM)的基础上提出了改进的产业用水关联分析方法,清晰地量化了产业部门间的直接用水与间接用水关联。Velfquez 将直接与完全消耗系数之间的差异进行比较,认为这是虚拟水在产业部门间迁移转换的结果。许健、汪党献等曾利用各类用水系数研究各个部门生产活动的用水关联以及对整个经济系统用水量的影响。这些研究实际上都为经济系统内部虚拟水循环机理的分析提供了借鉴。

2 研究现状特点

2.1 引入投入产出实际上将原本产品虚拟水转换为产业虚拟水的概念

由于微观上虚拟水计算所采用的彭曼公式计算的产品种类少,而将投入产出分析法作为宏观产业层面工业及服务产品虚拟水的一种补充替代算法。在价值型水资源投入产出表中,产业为用水单元,用水实物量往往取自产业耗用水量。严格讲,价值型投入产出方法计算的虚拟水含量还不完全等同于虚

拟水概念^[4],只是将宏观层面产业虚拟水概念替换了产品虚拟水。

2.2 运用投入产出分析未对虚拟水量化研究中的差异性单独针对性研究

虚拟水是指包含在产品生产过程中的用水,起点在于产品,而用价值型投入产出模型计算的虚拟水含量只是一种替代,因而必有局限性,缺少了产品生产过程中耗水的重要部分——降水及土壤水,也就是说只考虑了转移的虚拟蓝水量,而没有考虑虚拟绿水量,造成虚拟水产业层面耗水概念的缺乏,从而使结果变小。因此,区分“蓝水”(地表水及地下水)和“绿水”(降雨为植物所利用的)以及工业品生产中的“灰水”(利用后返回水系统的污水)成为当前虚拟水量化研究的一种趋势。

2.3 运用投入产出分析针对工业品、服务品的虚拟水量化研究不足

尽管采用投入产出分析能更有效地核算非农产业的虚拟水,但目前国内针对工业品虚拟水的量化研究要么是微观层面缺乏间接消耗的清单分析,要么是宏观层面作为替代概念的产业虚拟水^[8]。针对具体服务产品的测算更是缺乏,相关的量化研究还未见到。

3 发展方向与展望

3.1 虚拟水研究应回归其本源-产品层面

一方面,基于价值型投入产出模型计算的虚拟水含量只是将宏观层面的产业虚拟水概念替换了产

品虚拟水,因此,虚拟水研究应回归其本源—产品层面,尤其是针对工业品与服务产品的虚拟水研究。

另一方面,虽然理论上基于实物投入产出模型,可以从宏观产业层面到具体产品层面完成对工业与服务产品的虚拟水量化,但实践中由于实物产品分类、编制数据来源所限,单纯从投入产出分析角度,仍然不能很好解决非农产品虚拟水的测算问题,需要将宏观与微观层面结合,做进一步深入研究,找出具体针对性的解决途径。

3.2 非农产品在虚拟水量化研究中的差异性需要单独针对性研究

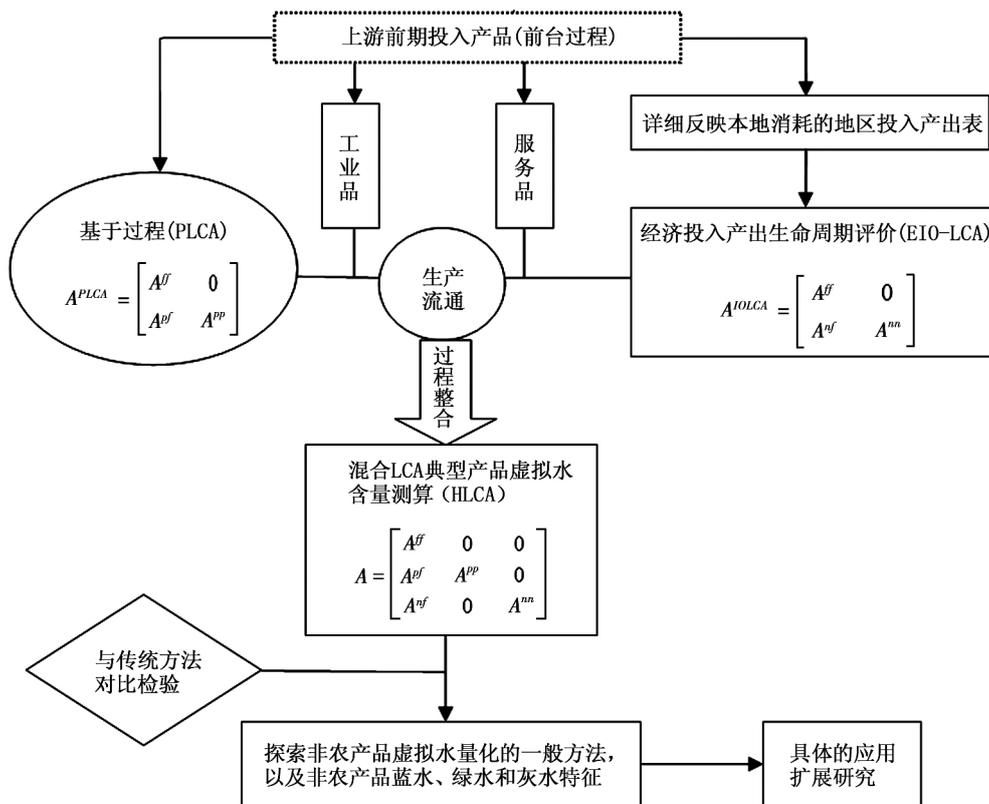
区分“蓝水”和“绿水”以及“灰水”成为当前虚拟水量化研究的一种趋势。这主要是由于有关虚拟水战略中的蓝绿水研究多集中在农牧业商品中,工业品中的研究较少。工业品中的蓝色虚拟水与农牧产品中的蓝色虚拟水在研究过程中情况不同,农牧产品是初级品,虚拟水总量也是边际量,而工业品一般是对初级原料进行加工,边际量与总量完全不一

样。因此,工业品与农牧产品蓝色虚拟水方面的差异有必要分别仔细加以研究。

对工业品来说,灰水的测算不容忽视。工业品生产与农牧产品生产在水资源利用方面最大的差异是农牧业商品生产属于自然经济,排泄物可在自然界循环利用,而工业品生产却排放污水,即灰色虚拟水。灰色虚拟水的一个特点是,由于是生产中排泄的污水,内容物及其浓度复杂,难以达成统一的量化手段或标准。简单地将排放的污水量直接当作灰色虚拟水量,同样遇到浓度与污染物成分难以比较以及难以与蓝色、绿色虚拟水加总的问题。因此需要将工业品与服务品灰色虚拟水脱离其他虚拟水单独研究与比较。

3.3 混合LCA为虚拟水量化研究提供了新的途径

基于投入产出分析研究虚拟水的不足,产业生态学中近年来发展的混合生命周期评价方法(HLCA)结合了宏观层面与微观层面,既节省人力物力又有效提高精确度,是值得借鉴的研究方法。



(注: f : 前台过程分析; p : LCA 后台过程数据; n : 投入产出商品数据; A^{PLCA} : 基于过程的 LCA 需求矩阵; $A^{EIO-LCA}$: 基于投入产出模型的 LCA 需求矩阵; A : 完全需求矩阵; A^{ff} : 前台过程需求矩阵; A^{pp} : 后台过程需求矩阵; A^{pf} : 前台过程到后台过程的上游投入产品矩阵; A^{nf} : 上游到后台系统的投入产品矩阵; A^{nn} : 后台经济系统需求矩阵。)

图1 混合生命周期评价(HLCA)示意图

混合生命周期评价将传统的面向过程的生命周期评估方法(LCA based on process analysis,简称PLCA)和经济投入产出生命周期评价(Economic Input-output based LCA,简称EIO-LCA)整合在同一分析框架内。两者均以生命周期评价原理为基础。具体的过程如图1所示。PLCA从微观生产角度出发,详细记录了产品生命周期里生产运输包装等的直接投入消耗或排放,通过生命周期清单分析得到研究对象的输入和输出数据清单,进而计算研究对象全生命周期的虚拟水含量。EIO-LCA由Hendrickson等提出,是一种自上而下的建模方式,以整个国民经济作为系统边界,用于分析产品或服务生产链中的环境影响,并且以投入与产出关系的数学模型表示经济部门间的相互关系,能够快速评价产品或服务的环境影响。这种基于经济投入产出模型的产品生命周期分析,也常用于虚拟水分析。HLCA结合了两种方法各自的优势,研究表明,HLCA与传统的LCA方法相比,准确性和可靠度提高了30%。

4 结语

本文围绕基于投入产出分析的虚拟水研究这一生态经济学界的热点问题,基于价值型投入产出模型从区域间的虚拟水贸易和产业间的部门用水关联两条线索对国内外的研究现状进行了比较客观、全面的回顾,归纳、总结了基于投入产出分析研究虚拟水的现状特点,最后,本文提供了虚拟水量化研究的新途径—混合LCA,希望弥补基于投入产出分析对非农产品虚拟水量化研究的不足。

参考文献:

- [1] 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 [C]. London: ODA, 1993: 13-26.
- [2] 程国栋. 虚拟水—水资源安全战略的新思路[J]. 中国科学院院刊, 2003(4): 260-265.

[3] 马忠, 张继良. 张掖市虚拟水投入产出分析[J]. 统计研究, 2008(5): 65-70.

[4] 黄晓荣, 裴源生, 梁川. 宁夏虚拟水贸易计算的投入产出方法[J]. 水科学进展, 2005, 16(4): 564-568.

[5] Kondo K. Economic analysis of water resources in Japan: using factor decomposition analysis based on input-output tables [J]. Environmental Economics & Policy Studies, 2005, 7(2): 109-129.

[6] Dietzenbacher E, Velazquez E. Analysing Andalusian virtual water trade in an input-output framework [J]. Regional Studies, 2007, 41(2): 185-196.

[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, 24(2): 286-294.

[8] 和夏冰, 张宏伟, 王媛, 等. 基于投入产出法的中国虚拟水国际贸易分析[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(3): 7-10.

[9] 张晓宇, 吴明, 曹和平. 中国虚拟水贸易结构变迁及空间分布研究[J]. 思想战线, 2014, 3(40): 150-153.

[10] Guan D, Hubacek K. Assessment of regional trade and virtual water flows in China [J]. Ecological Economics, 2007, 61: 159-170.

[11] Lenzen M. Understanding virtual water flows: a multi-region input-output case study of victoria [J]. Water Resource Research, 2009, 45: W09416.

[12] Wang Z Y, Huang K, Yang S S, et al. An input-output approach to evaluate the water footprint and virtual water trade of Beijing, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 42: 172-179.

[13] Chao Z, Anadon L D. A multi-regional input-output analysis of domestic virtual water trade and provincial water footprint in China [J]. Ecological Economics, 2014, 100: 159-172.

[14] 谭圣林, 邱国玉, 熊育久. 投入产出法在虚拟水消费与贸易中的新应用[J]. 自然资源学报, 2014, 29(2): 355-364.

[15] Hassan R M. Economy-wide benefits from water-intensive industries in South Africa: quasi-input-output analysis of the contribution of irrigation agriculture and cultivated plantations in the Crocodile River catchment [J]. Development Southern Africa, 2003, 20(2): 171-195.