

虚拟水研究与应用进展

黄晨龙¹, 方秦华^{1, 2}

(1. 厦门大学环境科学研究中心, 福建 厦门 361005; 2. 厦门大学海洋与海岸带发展研究院, 福建 厦门 361005)

摘 要: 虚拟水是解决水资源短缺和粮食安全问题的新途径, 是目前国际新兴的研究热点。文中系统地阐述了虚拟水的概念和内涵, 归纳总结了关于产品的虚拟水含量的计算方法, 包括基于不同产品类型区别计算的方法和产品生产树的方法。并且介绍了虚拟水的应用情况, 还对今后的研究方向进行了探讨。

关键词: 虚拟水; 虚拟水贸易; 虚拟水战略

中图分类号: X703

文献标识码: A

Study and Application Progress of Virtual Water

Huang Chenlong¹, Fang Qinhu^{1, 2}

(1. Environmental Science Research Center, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Coastal and Ocean Management Institute (COMI), Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Virtual water, a new research topic, is considered as an innovative solution to solve the problem of water scarcity and food security. This study expounded the concept and connotation of virtual water, and also summarized the methodologies to calculate virtual water, in terms of the methods based on distinguishing calculation of different product and the methods of production tree. Furthermore, the application of virtual water, as well as its further study directions was introduced.

Key words: virtual water; virtual water trade; virtual water strategy

前言

当前全球约有 2.32 亿人口面临缺水问题, 并且约有 1/5 的人口所使用的淡水资源无法达到卫生标准。在未来, 若不提出有效的用水措施, 全球所面临的缺水问题将日趋严重。因此, 水资源已成为全世界关注的热点, 如何实现对现有水资源的充分合理和可持续利用成为各国学者研究的关键。虚拟水 (Virtual Water, VW) 战略可以促进水资源的有效配置, 从而能够达到国家和地区的用水平衡, 解决缺水国家或地区的用水问题, 为全球缓解水资源危机提供了新途径。

1 虚拟水理论研究

Allan^[1] 最早提出虚拟水的概念, 并将虚拟水定义为“在生产产品和服务所需要的水资源数量, 被称为凝结在产品和服务中的虚拟水量^[2]。”其他学者对虚拟水的分类进行了研究, Hoekstra^[3] 把虚拟水分为“外生水”和“内嵌水”, “外生水指的是通过进口使用了非本土的水, 内嵌水则指的是在生产的一系列过程中所隐含的水。”Chapagain 等^[4] 则把虚拟水分为绿色虚拟水、蓝色虚拟水和稀释虚拟水: 绿色虚拟水主要指的是生产过程中消耗的地表水和地下水; 蓝色虚拟水是生产过程中消耗的大气降水(没有进入径流的部分); 稀释虚拟水则指的是稀释农产品生产过程中产生的污染物到符合环境标准所需要的用水量。

基于对虚拟水相关理论的研究, 刘宝勤等^[5] 认为, 虚拟水理论主要是在资源流动、资源替代理论和比较优势理论的基础上建立的, 而其他学者则对虚拟水的特征进行了总结^[6-7], 包括非真实性、社会交

收稿日期: 2012 - 07 - 27

基金项目: 国家自然科学基金(40701178); 福建省自然科学基金(2009J01190); 中央高校基本科研业务费项目(厦门大学教师类基础创新科研基金)(2011121008)

作者简介: 黄晨龙(1988 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为流域水资源管理。

通讯联系人: 方秦华

易性和转移的便捷性等。

2 虚拟水含量的计算方法

农产品的虚拟水含量是虚拟水含量量化的主要研究部分。目前,计算农产品虚拟水含量的方法主要有两种,分别是 Zimmer and Renault^[8]提出的基于不同产品类型区别计算的方法,以及 Chapagain and Hoekstra^[9]提出的产品生产树的方法。Zimmer and Renault^[8]根据产品的不同特性和生产方式,将农产品分为初级产品、加工产品、转化产品、副产品、多功能产品和低耗水或不耗水产品 6 类。前 4 类商品的计算方法和产品生产树的方法基本相同。后两类产品目前则是将虚拟水与实际生产过程相分离,采用营养等值规律计算虚拟水含量;如通过计算提供同样能量和蛋白质的替代动物产品的虚拟水量,可以得出海产品和鱼的虚拟水含量约为 $5 \text{ m}^3/\text{kg}$ ^[10]。

Chapagain and Hoekstra^[9]提出的产品生产树的方法将农产品分为作物产品和牲畜及畜产品两类,下面分别介绍两类产品的计算方法。

2.1 农作物虚拟水含量的计算

农作物的虚拟水含量主要取决于农作物的类型和农作物生长的自然条件,目前计算农作物的虚拟水化时一般不考虑农作物本身所含的水分,而把需水量简单地等同于农作物在生长周期中的累积蒸腾量(ETc)。ETc 主要受包括气象因素、作物类型、土壤条件及种植时间等因素的影响,其计算公式为:

$$ETc = Kc \times ET_0 \quad (1)$$

式(1)中,ET₀为参考农作物蒸发蒸腾水量,Kc为农作物系数,反映实物作物相对于参考作物的覆盖度和表面糙率等的差异,是实际作物与参考作物的物理和生理等各种因素的综合反映。

在计算ET₀时,一般进行简化处理,忽略作物类型、作物发育和管理措施等因素对作物需水的影响,现今的研究一般根据世界粮农组织(FAO)推荐并修正的标准彭曼公式进行计算^[11-12]。

2.2 动物产品虚拟水含量的计算

动物产品的虚拟水含量主要由动物的品种、饲养的结构及动物生长的条件等因素决定,因此,动物虚拟水指的是其整个生命周期中所消耗的水资源量,包括动物整个生命周期所消耗饲料的虚拟水含量、动物整个生命周期饮用水量和饲养动物过程中的服务用水(如清扫及清洁用水)^[8]。由于计算需

要的很多数据难以获取,为简化处理,现在计算动物产品的虚拟水含量一般采用经验系数法。荷兰水文和环境工程研究所(IHE)计算了各国动物产品的虚拟水含量,目前大多数研究都采用他们的研究成果来计算动物产品的虚拟水含量^[11,13-14]。

2.3 其它产品的虚拟水含量计算

目前的研究中,较少有专门关于农产品以外的其它产品的虚拟水含量研究。项学敏等^[15]根据工业产品生产中水及虚拟水的消耗途径,从生产者角度设定工业产品虚拟水的计算公式:

$$\begin{aligned} \text{某工厂年产工业产品所含虚拟水总量}(\text{m}^3) = & \text{年原材料用水和燃料生产用水} + \text{年原材料和燃料运输用水} \\ & + \text{年生产过程中机械损耗折合生产用水} + \text{年生产人员生产生活用水} \\ & + \text{年生产过程的添加用水} + \text{年服务性用水} \end{aligned} \quad (2)$$

其它研究中,一般在计算一个地区总的虚拟水消费情况时会考虑其它产品的虚拟水含量,较常用的计算方法是投入产出法。农作物产品和动物产品中的虚拟水含量也可用此法进行计算,且适合对所有产品进行计算,但需要相对齐全的数据量。目前有相当一部分研究就是基于投入产出的方法来分析虚拟水的消耗量^[16-17]。

3 虚拟水的应用

3.1 虚拟水战略

虚拟水战略,是指贫水国家(地区)通过贸易的方式从富水国家(地区)购买水资源密集型农产品,特别是粮食^[18],以解决缺水国家(或地区)的水资源短缺和粮食安全问题。

世界上最早实施虚拟水战略的国家是以色列,它缓解本国用水压力主要手段就是将本国高水耗的产品生产转移到水资源丰富的地区,同时进口高水耗产品,以实现粮食安全的保障。1998年至2004年尼罗河流域国家每年的虚拟水净进口量为27亿 m^3 ^[19]。非洲国家也一直致力于实施虚拟水战略,南部非洲发展共同体的其它国家每年通过玉米进口从南非引进的虚拟水达 $6.5 \times 10^7 \text{ m}^3$ ^[20]。

中国是全球13个人均水资源最短缺的国家之一,为解决中国自身粮食问题,中国也频频从外国购入粮食产品。同时,在中国国内地区间也存在虚拟水的转移,表1总结了相关的研究。

表 1 中国虚拟水战略实施的相关研究

时间	研究者	研究成果
2006 年	Ma 等 ^[21]	中国北方每年通过粮食贸易向南方地区输送的虚拟水含量达 520 亿 m ³
2007 年	Lp 等 ^[22]	2000 年张掖市的虚拟水净出口量达 0.568 亿 m ³
2008 年	杨阿强 ^[23]	2005 年中国与东盟的农产品贸易中净进口虚拟水量为 7.3 亿 m ³
2009 年	覃德华等 ^[11]	2006 年福建省的虚拟水出口量为 70.855 亿 m ³ , 进口量为 50.878 亿 m ³ , 虚拟水贸易量出口大于进口
2009 年	Wang and Wang ^[24]	2004 年和 2007 年北京虚拟水进口量分别为 1.79 亿 m ³ 和 1.84 亿 m ³
2010 年	徐立青和李洪香 ^[6]	统计了中国 2000 年 - 2006 年进出口粮食作物虚拟水贸易总量, 结果显示中国虚拟水净进口量总体呈上升趋势, 2000 年为 11.888 7 亿 m ³ , 2006 年为 59.325 4 亿 m ³
2010 年	吴普特等 ^[25]	总结了 1990 年 - 2008 年中国农业“北水南调虚拟工程”的情况, 虚拟水调出量呈现持续增加态势, 年平均增幅为 19.94 亿 m ³ , 平均调出水量约为 233.83 亿 m ³ , 2008 年达到 1990 年以来的最大值 523.50 亿 m ³

从表 1 可见, 中国的粮食作物处于虚拟水净进口的态势, 并且还在增长。因此, 实施虚拟水战略对于缓解中国粮食安全具有重大意义。此外, 如何优化中国内部地域间的虚拟水战略实施, 亦是急需解决的重要问题。

3.2 国际贸易

国际贸易在虚拟水研究时也称虚拟水贸易, 指的是一个国家(或地区)通过商品贸易的形式, 从另一个国家或地区购买水资源密集型产品, 达到进口(虚拟)水资源的目的, 同时实现节约水资源, 提高水资源安全和粮食安全的目标。

目前, 虚拟水贸易主要通过农产品交易来实现水资源的转移, 这是全球范围内实施虚拟水战略的最主要手段, 也是实现虚拟水转移的最有效途径。有研究表明, 1985 年 - 1999 年期间, 全球五种主要农作物和三种动物产品出口导致的虚拟水流动大约为 545 km³/a^[26]。IHE 统计了 1999 年 - 2005 年期间世界农产品虚拟水进出口最多的 10 个国家, 其中第一出口大国为美国, 虚拟水净出口数达 758.3 亿 m³, 另外包括加拿大、泰国、阿根廷等国; 而虚拟水进口第一大国是斯里兰卡, 进口量高达 428.5 亿 m³, 中国也在前十之列, 虚拟水净进口量达 101.9 亿 m³, 其它进口大国还有日本、荷兰、韩国等^[27]。其它研究中, 有调查显示, 约旦河谷地区每年通过水果的国际贸易可以净进口 0.48 亿 m³ 的虚拟水^[28]; 2006 年墨西哥的虚拟水净进口量为 29.859 亿 m³, 并从 2000 年起开始呈增长趋势^[29]。如今, 各国都在积极地通过国际贸易的形式来改善本国自身的水资源问题, 避免由于水资源短缺造成的各种问题。

3.3 生态水足迹研究

水足迹理论是由 Hoekstra 于 2002 年提出的基于消费基础反映水资源利用情况的一种新方法, 指

的是“某个区域内生产这些人口所消费的所有资源所需要的水资源数量^[3]。”换言之, 在计算一个国家或地区的水足迹时, 需要考虑该国家或地区的净进口虚拟水量。目前开展的生态水足迹研究中大多数是分析和计算国家或地区尺度的水足迹, 并利用水足迹概念评价地区的水资源状况。例如, 有学者在虚拟水概念的基础上, 分别在国家、省市及流域尺度上对水足迹进行分析计算, 并对水资源利用状况进行评价^[14, 16, 24]; 还有学者利用水足迹的概念和计算方法, 对农作物的生产用水状况进行分析^[30]。通过对水足迹的计算分析, 可以清楚了解地方的水资源利用和分配状况, 充分利用基于虚拟水的研究成果可以提高地区的水资源利用效率, 优化水资源配置。

4 总结

由于虚拟水提出的时间不长, 还属于一个新兴的研究领域, 因此无论国内或国外, 关于对虚拟水的研究方法和理论还不甚成熟, 基本还处于基础理论的研究阶段。尤其在中国, 2003 年才由程国栋院士将虚拟水概念引入中国, 相对于国外还处于落后阶段。目前, 学者对于虚拟水的研究对象还比较单一, 存在很多亟待解决的问题: (1) 目前的研究对象主要集中在农作物产品和动物产品上, 很少涉及其它领域的研究, 有必要扩展虚拟水的研究范围; (2) 现有的虚拟水的精确计算方法相对繁琐和复杂, 需要有大量的数据基础, 因此大部分研究都是基于他人的研究成果获得, 但由于时间和空间不同, 直接使用经验系数法所得的结果和实际情况会存在一定差异, 鉴于此, 有必要进一步探索更为简化和准确的计算方法; (3) 目前对虚拟水贸易的研究大部分都是从水资源的比较优势出发, 很少有考虑其它非水因

素的影响,例如地区人均耕地面积等社会经济因素的影响,国外学者已经注意到这点弊病^[31],并有学者涉足研究虚拟水贸易对水资源质量造成的影响^[32]; (4) 现在国内学者主要研究的是实施虚拟水战略的意义、对水足迹和水资源承载力进行研究,而国外学者已经开始利用虚拟水概念进行水资源管理^[33]、探讨虚拟水视角和政策决定的关系^[34]等问题,但具体如何实施虚拟水战略,国内外学者都尚未给出研究性成果; (5) 研究中只意识到实施虚拟水战略的正面影响,但很少有考虑到具体实施后可能造成的负面影响,国外有个别学者已经提出这个问题^[35],这是需要在今后的研究中多加考虑。

参考文献:

[1] Allan J A. Fortunately There are Substitutes for Water Otherwise Our Hydro - political Futures Would be Impossible [M]. In: ODA, Priorities for Water Resources Allocation and Management. London: ODA, 1993: 13 - 26.

[2] Allan J A, Karshenas M. Managing environmental capital: the case of water in Israel, Jordan, the West Bank and Gaza, 1947 to 1995, in Allan J A and Court J H [R]. Water, peace and the middle east: negotiating resources in the Jordan Basin. London: I. B. Taurus Publishers, 1996: 124 - 154.

[3] Hoekstra A Y. Virtual water trade: an introduction [A]. Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Value of Water Research Report Series No. 12 [C]. IHE DELFT, 2003, 13 - 23.

[4] Chapagain A K, Hoekstra A Y, Savenije H G, Gautam R. The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries [J]. Ecological Economics, 2006, 60(1): 186 - 203.

[5] 刘宝勤, 封志明, 姚治君. 虚拟水研究的理论、方法及其主要进展 [J]. 资源科学, 2006, 28(1): 120 - 127.

[6] 徐立青, 李洪香. 虚拟水与我国粮食贸易结构优化 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(6): 3183 - 3188.

[7] 鲁仕宝, 黄强, 马凯, 等. 虚拟水理论及其在粮食安全中的应用 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 59 - 64.

[8] Zimmer D, Renault D. Virtual water in food production and global trade: review of methodological issues and preliminary result [J]. in: Hoekstra A Y (ed.), Virtual Water Trade. IHE Delft: 2003(12): 93 - 107.

[9] Chapagain A K, Hoekstra A Y. Virtual Water Trade: a Quantification of Virtual Water Flows between Nations in Relation to International Trade of Livestock and Livestock Products [J]. In: Hoekstra, A. Y. (Ed.), Virtual Water Trade: Pro-

ceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Research Report Series. IHE Delft, The Netherlands. 2003(12): 68 - 87.

[10] 王新华, 张志强, 龙爱华, 等. 虚拟水研究综述 [J]. 中国农村水利水电, 2005(1): 27 - 30.

[11] 覃德华, 李娜, 何东进, 等. 基于虚拟水的福建省 2006 年水足迹评价 [J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2009, 38(4): 400 - 405.

[12] 李秀波, 田爱民, 董宁, 等. 济南市部分农作物产品虚拟水含量的研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(2): 116 - 118.

[13] 陈俊旭, 张士锋, 华东, 等. 基于水足迹核算的北京市水资源保障研究 [J]. 资源科学, 2010, 32(3): 528 - 534.

[14] 王新华, 龚爱民, 郭美华, 等. 基于水足迹的云南省大理州水资源利用评价 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(20): 10870 - 10874.

[15] 项学敏, 周笑白, 周集体. 工业产品虚拟水含量计算方法研究 [J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(2): 179 - 184.

[16] 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.

[17] Zhang Z, Yang H, Shi M. Analyses of water footprint of Beijing in an interregional input - output framework [J]. Ecological Economics, 2011, 70: 2494 - 2502.

[18] 程国栋. 虚拟水 - 中国水资源安全战略的新思路 [J]. 中国科学院(院刊), 2003, 18(4): 260 - 265.

[19] Zeitoun M, Allan JA, Mohieldeen Y. Virtual Water 'flows' of the Nile Basin, 1998 - 2004: A first approximation and implications for water security [J]. Global Environmental Change - Human and Policy Dimensions, 2010, 20(2): 229 - 242.

[20] Dabrowski JM, Masekoameng E, Ashton PJ. Analysis of virtual water flows associated with the trade of maize in the SADC region: importance of scale [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13(10): 1967 - 1977.

[21] Ma J, Hoekstra A Y, Wang H, et al. Virtual versus real water transfers within China [J]. Philosophical Transactions of The Royal Society B - Biological Sciences, 2006, 361(1496): 835 - 842.

[22] Lp W C, Wong H, Jun X, et al. Input - output analysis of virtual water trade volume of Zhangye [A]. International Congress on Modeling and Simulation Land Water and Environmental Management: Integrated Systems for Sustainability [C]. Virginia, VA, 2007: 1980 - 1984.

[23] 杨阿强, 刘闯, 赵晋陵, 等. 中国与东盟农产品贸易虚拟水概算 [J]. 资源科学, 2008, 30(7): 999 - 1003.

[24] Wang HR, Wang Y. An input - output analysis of virtual water uses of the three economic sectors in Beijing [J]. Water International, 2009, 34(4): 451 - 467. (下转第 51 页)

应更换新水源地;对缺乏水处理设施的饮水工程,要增加水处理和消毒设施;对水源水质和水量有保证、人口居住较集中的自然村庄,应建设集中式供水工程,并尽可能提高规模,供水到户;对建设资金不足、农民收入偏低的村庄,供水系统可暂时先建到集中给水点,待经济条件具备后再解决自来水入户问题。对于位置偏远、人员分散的地区,可以考虑生态移民。

第三,切实采取措施加强集中式水源地的保护。根据水源工程的不同类型和所处的地理位置,按照《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2005)和《水污染防治法》等法律法规,划定供水水源保护区,制定保护措施。特别是要加强对饮用水源地周边污染源排放的管理,禁止设置生活居住区和禽畜饲养场、渗水厕所、渗水坑,禁止倾倒和堆放生活垃圾、粪便、农业生产固体废物或铺设污水管道,加强水源涵养林的建设,大力推广沼气池,全面开展改水改厕,普及科学施用化肥,提倡文明卫生的生活习惯等^[6]。

第四,从源头抓起,防治结合。对于因污染引起不安全饮用水,要以污染源预防为主,防治结

合,采取综合整治措施。加大节约用水和中水回用力度,加强点源和面源污染治理,并结合村容整洁,将供水、水环境治理与农村改厕相结合,减少源头污染。

参考文献:

- [1]崔浩辉.在国家农村饮水安全工作会上的讲话[EB/OL].2004-11-29.http://hwcc.com.cn.
- [2]金鑫,曾菊新.基于新环境伦理观的江汉平原农村饮水安全问题研究[J].理论月刊,2006(6):169-172.
- [3]傅江漫,王发元,金卫斌,等.农村集中供水管理存在的问题及改革建议-以湖北省荆州市农村集中供水管理为例[J].中国农学通报,2010,26(21):48-412.
- [4]国家环保总局,国家质量监督检验检疫总局.中华人民共和国国家标准 GB3838-2002 地表水环境质量标准[S].北京:中国环境出版社,2003.
- [5]国家技术监督局,国家质量监督检验检疫总局.中华人民共和国国家标准 GB/T14848-93 地下水质量标准[S].北京:中国标准出版社,1994.
- [6]郑国锋,柴茂林.阜新市农村饮水安全问题现状与对策[J].南水北调与水利科技,2007,5(1):50-53.

(上接第 46 页)

[25]吴普特,赵西宁,操新春,等.中国农业“北水南调虚拟工程”现状及思考[J].农业工程学报,2010,26(6):1-6.

[26]Hanasaki N, Inuzuka T, Kanae S, et al. An estimation of global virtual water flow and sources of water withdrawal for major crops and livestock products using a global hydrological model[J]. Journal of Hydrology, 2010, 384(3-4): 232-244.

[27]Hoekstra AY, Hung PQ. Globalization of water resources: International virtual water flows in relation to crop trade [J]. Global Environmental Change - Human and Policy Dimensions, 2005, 15(1): 45-56.

[28]Mourad KA, Gaese H, Jabarin AS. Economic Value of Tree Fruit Production in Jordan Valley from a Virtual Water Perspective [J]. Water Resources Management, 2010, 24(10): 2021-2034.

[29]Arreguin-Cortes F, Lopez-Perez M, Marengo-Mogollon H, et al. Virtual water in Mexico [J]. Ingenieria Hidraulica En Mexico, 2007, 22(4): 121-132.

[30]盖力强,谢高地,李士美,等.华北平原小麦、玉米作物生产水足迹的研究[J].资源科学,2010,32(11):2066-2071.

[31]Faramarzi M, Yang H, Mousavi J, et al. Analysis of intra-country virtual water trade strategy to alleviate water scarcity in Iran [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 114(8): 1417-1433.

[32]Dabrowski JM, Murray K, Ashton PJ, et al. Agricultural impacts on water quality and implication for virtual water trading decisions [J]. Ecological Economics, 2009, 68(4): 1074-1082.

[33]Prochaska C, Dioudis P, Papadopoulos A, et al. Applying the virtual water concept at regional level: The example of Thessaly (Greece) [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2008, 17(5): 601-607.

[34]Wichelns D. Virtual Water: A Helpful Perspective, but not a Sufficient Policy Criterion [J]. Water Resources Management, 2010, 24(10): 2203-2219.

[35]Wichelns D. Virtual Water and Water Footprint Offer Limited Insight Regarding Important Policy Questions [J]. International Journal of Water Resources Development, 2010, 26(4): 639-651.