

文章编号: 1672-3031(2007)04-0066-08

虚拟水理论与方法的研究进展

王红瑞¹, 韩兆兴², 韩鲁杰¹, 何丽娟³

(1 北京师范大学 水科学研究院- 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875; 2 北京师范大学 环境学院, 北京 100875;
3. 北京师范大学 外国语言文学学院, 北京 100875)

摘要: 虚拟水是当前研究的热点领域, 是实体水资源概念在经济社会领域中的拓展。本文在对虚拟水相关概念和意义介绍的基础上, 对国内外有关虚拟水问题的研究进展分虚拟水理论研究、虚拟水贸易与粮食安全、虚拟水战略、水生态足迹、虚拟水量化等 5 个方面进行了归纳和总结, 最后探讨了未来虚拟水的研究方向, 认为水资源概念的扩展、虚拟水的量化、以虚拟水概念理论制定相关政策、水生态足迹和虚拟水贸易平衡等 5 个方面是未来可以深入讨论的重点。

关键词: 虚拟水; 虚拟水贸易; 虚拟水战略; 水生态足迹

中图分类号: TV213 文献标识码: A

1 研究背景

水问题是 21 世纪人类面临的主要问题之一^[1]。尽管从水循环的角度看, 水资源总量完全可以满足人类需求, 但水资源分布的极端不均匀和人口分布的不平衡使得很多地区和国家都出现了严重的水资源短缺现象。随着人口的高速增长和经济的快速发展, 水压力会越来越大。

虚拟水的思想起源于 Fishelson^[2]在评价以色列农业时提出的“物化水”概念, 他认为大量水资源密集型农作物的出口对以色列来说是不可持续的。1994 年英格兰伦敦大学非洲和东亚研究学院 J. Anthony Allan 正式提出了“虚拟水”的概念, 即指农产品生产过程中所消耗的水资源数量, 由于这种水是虚拟在商品中的, 因此称为“虚拟水”, 也被称为“嵌入水”和“外生水”^[3]。“嵌入水”是指特定的产品以不同的形式包含有一定数量的水^[4]。“外生水”则指进口虚拟水的国家或地区使用了非本国或本地区的水。因此对水资源短缺的国家来说, 进口食品不仅是在购买粮食, 而且还是在进口水资源。从“节流”的角度看, 还可认为虚拟水是由进口所节约的水资源, 这些水资源可以被用来生产经济价值更高的商品, 从而提高水资源的利用效率。

2 虚拟水的研究意义

当前, 全球有 26 个国家约有 2.32 亿人口面临着缺水问题, 大约 4 亿人口的用水速度超过水资源的更新速度, 约有 1/5 的人口得不到达到卫生标准的淡水资源。未来 30 年, 中国水资源短缺对粮食生产的制约作用会日趋显著, 我国要在 30 年左右的时间增加 1.5 亿 t 粮食生产能力才能满足粮食需求^[5]。传统上, 人们对水和粮食习惯于在问题发生的区域范围内寻找解决问题的方案, 而虚拟水则从系统的角度出发, 运用系统思考的方法寻找与问题相关的各种各样的影响因素, 从问题发生的范围之外寻找解决问题的应对策略^[6]。

对虚拟水的研究是从经济方面而不仅是从资源和环境方面来解决缺水问题, 从问题范围之外而不仅是从问题范围之内寻求解决途径, 从宏观政策方面而不仅是从技术方面解决缺水问题。Allan 特别针

收稿日期: 2007-05-14
基金项目: 国家科技支撑项目(2006BAD20B06)
作者简介: 王红瑞(1963-), 男, 河南人, 副教授, 主要从事水文水资源、环境规划评价研究。E-mail: henryzsr@bnu.edu.cn

对那些水资源不足和外贸欠缺的国家,阐述了虚拟水贸易的必然性^[7]。虚拟水的提出不仅对缓解国家或地区出现的水资源短缺、保障缺水地区的食品安全和水安全提供新的思路,而且对资源配置优化、区域经济结构调整,增加地区以及全球的水资源利用效率,为水资源迁移和储存提供新的途径,为国家和地方相关政策的制定提供参考,为其他社会目标和社会福利的完成奠定基础。

3 国内外虚拟水研究进展

虚拟水的概念一经提出,就引起了人们广泛的关注。在最近的十几年中,从不同的方面对虚拟水理论进行了探讨。2002年12月在荷兰代尔夫特第一次召开了关于虚拟水的国际会议,2003年3月召开的第3届世界水论坛上又对虚拟水贸易进行了专题讨论^[8]。以下针对虚拟水理论研究、虚拟水贸易与粮食安全、虚拟水战略、水生态足迹、虚拟水量化等5个方面就国内外关于虚拟水研究进展进行综述。

3.1 虚拟水理论研究 自虚拟水的概念问世以来,有关虚拟水概念与内涵的报道不断涌现^[1,7,13]。A. K. Chapagain 等^[9]将虚拟水分为绿虚拟水、蓝虚拟水和稀释虚拟水。绿虚拟水和蓝虚拟水分别指农产品生产过程中所消耗的绿水和蓝水。稀释水是指将农产品的生产过程中所产生的污水稀释达到标水的用水量,用于评价水污染状况。在对棉花水生态足迹的研究中,他们发现农作物的种植过程主要产生的是绿虚拟水和蓝虚拟水;农作物的加工过程主要产生的是稀释虚拟水。有些国家主要进行原材料的出口贸易,那么主要产生绿虚拟水和蓝虚拟水,会影响这些国家的可利用水资源总量。而一些国家进口原材料后,通过国内加工再出口到国外,主要产生稀释虚拟水,对水质会产生影响,但对水资源总量的影响相对较小。根据计算结果,与棉花产品有关的国际贸易中虚拟水量为204Gm³/年,其中蓝虚拟水占43%,绿虚拟水占40%和稀释虚拟水占17%。

随着工业产品生产和服务业对水资源消耗量的增加,将虚拟水的概念从农产品范围扩展到所有商品,并且将虚拟水分为淡水虚拟水和污水虚拟水^[10]。淡水虚拟水指商品生产过程中所消耗的淡水资源。进口的商品在生产过程中会产生一定量的污水,因此污水虚拟水是指国家进口商品所避免产生的污水量。对于进口国,淡水虚拟水就是进口水资源,而污水虚拟水则是在保护本国的环境和生态。研究者对虚拟水的不断细化,不但使得虚拟水的概念更加丰富,而且将研究方向从水量的多少扩展到水质的优劣,从水资源一个方面的研究扩展到对环境和生态的整体保护范围。

在国内,程国栋^[11]最早提出了虚拟水及虚拟水战略,认为虚拟水理论是保证我国水资源安全的新思路和新方法。此后,我国的学者也对虚拟水的问题进行了相应研究。刘宝勤等^[12]认为虚拟水的理论基础主要包括3点,分别为资源流动理论、资源替代理论和比较优势理论。而且以往对于水资源短缺和食品安全的研究仅是从农业科学的角度出发,研究农业生产中所消耗的水资源数量,而虚拟水理论则是从经济学的角度出发,研究生产用水所具有的多种机会成本。虚拟水理论的基本原理为两点:一是比较优势理论;二是社会调适能力。对于后者,虚拟水是一种对于资源短缺而不得不形成的适应^[13]。王红瑞等^[14]对我国今后的虚拟水及虚拟水贸易研究中值得关注的问题进行了讨论。就目前国内的研究来说,对于虚拟水的理论基础研究刚开始起步,对虚拟水背后隐藏的生态与环境效用以及正外部性还没有更多的涉及。

3.2 虚拟水贸易与粮食安全 虚拟水具有交易性,在国际和国内贸易中会随着商品的进出口而流动。由于粮食中虚拟水含量较高,因此很多学者将粮食安全与虚拟水贸易联系起来^[15,16]。Allan^[17]等很多学者都认为虚拟水贸易是比较优势理论在资源和环境方面的延伸。Greenaway^[18]提出埃及在桔子、土豆、棉花和西红柿的种植方面具有比较优势,而在小麦、玉米和大豆的种植方面具有相对劣势。还有研究表明,在埃及利用每单位的水资源,蔬菜和棉花所产生的价值比玉米、稻米和甜菜的高;而利用每单位的土地资源,稻米所产生的价值比小麦、玉米和蚕豆的高^[19]。水资源丰富的国家在水资源方面具有比较优势,应该在国内生产水密集型的商品然后进行贸易^[20]。Wichelns^[21]进一步分析了水资源机会成本的作用,利用经济模型讨论了虚拟水在保证食品安全中的作用,并且把虚拟水纳入经济增长、粮食安全、提高人民福利等一系列国家宏观目标下进行研究,扩大了虚拟水研究领域。Wichelns认为虚拟水贸易只是

在水资源方面的比较优势,并不应该在政策的制定方面完全依赖虚拟水贸易,在确定比较优势的时候,不能仅考虑水资源方面的优势或劣势,而应该全面地考虑到土地、劳动力和技术等诸多方面,从而确定优势项目进行生产和贸易。通过对土地、水和技术等方面可能出现的不同情况进行分析,得出不是所有的国家都适合于进行虚拟水贸易。Wichelns 指出了虚拟水贸易与比较优势理论之间的差异,利用比较优势理论对资源与贸易之间的关系进行了理性分析。

提高水资源利用效率是虚拟水贸易中的又一重要研究课题。普遍认为提高水资源的利用效率可以从3个方面进行改进^[22]。(1)通过调整水价、提高节水技术来提高当地水资源利用效率;(2)将水资源在各个部门之间进行有效分配,使单位水资源产生更高的价值;(3)利用虚拟水贸易对水资源的全球分布进行合理的“调整”。M. Dinesh Kumar 和 O. P. Sign^[23]发现驱动虚拟水流动的一个重要因素是耕地面积,虚拟水总是从水资源短缺但耕地丰富的国家或地区流入到水资源丰富但耕地短缺的国家或地区。与水资源丰富地区的应用效率相比,水资源短缺的地区利用效率较高,那么水资源短缺的国家和地区就可以从水资源丰富的国家或地区实施调水工程,然后再将生产出的粮食返销给水资源出口国或地区,提高水资源的利用效率。这使得水资源以实体形式从富水国流出,又以虚拟形式流回去。在对中国的研究中,仅从水资源的角度看,中国北方地区应该进口耗水量较高的商品而出口耗水量较小的商品,而南方地区则应该相反^[10]。这就需要对中国南北方的贸易结构进行一定的调整,增加水资源的分配效率。Hong Yang 和 Alexander L. J. B. Zehnder^[24]建议中东南部地区的国家应该大力发展工业和服务业(特别是旅游业)而不应该将有限的水资源大量投入到耗水量很大的农业部门。对于农业部门内部,则对耗水量较少而经济价值很高的非谷类农作物应该多投入水资源。虽然很难说明这种利用在多大程度上提高了水资源利用效率,但虚拟水毕竟是一个新的视角。由于距离、成本、政治等问题,很多国家间的调水都是很难完成的,但贸易中的虚拟水是确实存在的,虚拟水贸易是一种改善水资源利用效率、保证食品安全的途径^[2]。

在国内,柳长顺等^[25]通过对国家市场、外汇能力和对农民所产生影响的3个方面进行了分析,研究了未来中国实行虚拟水贸易的可行性。尽管虚拟水贸易可以缓解中国水资源短缺问题,但是未来保证粮食安全与粮食进口两者是缺一不可的。实体水从富水地区流向缺水地区,而虚拟水从缺水地区流向富水地区,对于虚拟水贸易来说不仅与水资源的丰富程度有关,还与当地的气候条件和技术情况相联系^[26]。同时,把南水北调和虚拟水贸易联系起来,认为虚拟水贸易可作为南水北调的一种补充,在保障缺水地区的水安全方面发挥重要的作用。国内学者对虚拟水贸易的研究结果证实了 Wichelns 理论的正确性,说明了虚拟水贸易需要符合比较优势理论学的原理,不应该只关注于水资源利用这一个方面。

3.3 虚拟水战略 虚拟水战略指的是富水国家或地区通过实物贸易向贫水国家或地区输出水密集型产品也就是向贫水的国家以虚拟水的形式输出了水资源。目前对于虚拟水战略的研究涉及到两个方面。

3.3.1 虚拟水战略与水安全 缺水国家可以从富水国家进口粮食食品,从而保证食品安全。世界水资源委员会(WWC)和联合国粮农组织(FAO)以产品使用地为基础估计了2000年全球的虚拟水贸易流量为13 400 亿 m^3 ,其中60%体现在农作物的产品贸易中^[27]。在分析未来的食品安全中不仅要从整体考虑还需要关注地方的食品安全问题,真正驱动虚拟水流动的不是淡水的短缺而是耕地资源的缺乏,使得食品安全从单纯的水资源方面变得多元化^[23]。Anthony 等^[28]分析计算了中东和北非一些国家农产品虚拟水的进出口量的变化情况,阐述了虚拟水对南非粮食安全的作用。

结合当前我国对外贸易的发展状况,王红瑞等^[29]初步计算了2000~2002年我国农产品的虚拟水贸易量,3年间,我国农产品的虚拟水贸易一直保持较大逆差,虚拟水的净进口总量维持在每年40 亿 m^3 左右。这意味着通过虚拟水贸易,每年从外部获取的虚拟水资源缓解了国内约40 亿 m^3 左右的水资源压力,这个数值相当于每年我国水资源短缺量的10%~15%。

3.3.2 虚拟水战略对水资源管理、生态、经济和社会文化的影响研究 Hong Yang 等^[24]量化了水资源与食品进口的关系,发现谷物食品贸易和其他农产品贸易在缺水国的食品安全和经济增长方面起着非常重要的作用,物化在食品中的“虚拟水”对缺水国来说是一个有效利用有限水资源的方式。在计算了世

界上不同国家年平均虚拟水贸易的平衡量后, Chapagain 等^[30]发现通过虚拟水贸易相当于节约了我国 194 亿 m^3 的水资源。此处体现出虚拟水的政治作用和社会作用, 对于虚拟水战略的实施, 不仅是建立在比较优势的理论层面, 而是从食品安全甚至是社会安全的角度提出的, 因此虚拟水对于国家和地区的生态安全和社会安全方面所起到的作用也逐渐成为热点问题。

秦丽杰等^[31]认为虚拟水战略的作用在于 3 个方面: (1) 可以解决当地的粮食需求、缓解当地水资源短缺问题; (2) 可以促进农业生产结构的调整和优化; (3) 为水资源管理提供新对策。龙爱华等^[8]计算了 2000 年新疆、青海、甘肃、陕西 4 省(区)居民消费的虚拟水数量和人均虚拟水消费情况, 分析了虚拟水战略对西北地区解决水资源短缺问题的政策涵义, 提出了西北地区应用虚拟水战略的前景和有关措施。在对三江平原实施虚拟水战略实际意义的研究中, 发现三江平原水资源丰富, 开发容易, 成本低, 实施虚拟水战略可以提高水资源有效利用率和生产率, 为国内外水资源短缺地区的水安全、粮食安全、生态环境安全做贡献, 从而发展三江平原区域生态和虚拟水经济^[32]。虚拟水战略应该适应城市化的发展水平, 并结合当地的经济实力和生态平衡因素^[33]。前两者为北京实施虚拟水战略提供了进行虚拟水贸易的空间, 而后者限制了这一空间的过分扩张。王红瑞等^[34]分析了历年北京农产品虚拟水结构的变化, 利用投入产出方法计算了北京市农产品虚拟水的贸易量, 并将其与北京市地下水分布和开采情况进行了现状对比, 从虚拟水的角度提出了缓解地下水资源紧缺的途径, 提出应该调整和优化种植结构, 减少水稻种植面积增加蔬菜种植面积, 减少玉米出口增加大米的进口量。水资源分布不均和水量的不足使得国内的学者们从单纯的节约水资源方面延伸到虚拟水的战略上, 今后虚拟水战略在解决上述两个问题方面将起到非常重要的作用。

3.4 水生态足迹 水生态足迹概念的提出与生态足迹和虚拟水概念都是分不开的。一个人口的“生态足迹”是指在确定的区域内, 特定的物质生活条件下, 一个丰富的陆地生态系统和水生态系统所需要产生的资源和吸收的废物^[35]。

Hoekstra 和 Hung^[36]将水生态足迹定义为任何已知人口(一个国家、一个地区或一个人)在一定时间内消费的所有产品和服务所需要的水资源数量。生态足迹是从宏观上对资源进行研究, 而水生态足迹是在研究对水资源的利用。一个国家或地区的水生态足迹等于国内用水量(WU)和虚拟水量净进口(NVWI)的代数。水生态足迹可以分为两类, 一类是内部水生态足迹, 另一类是外部水生态足迹。内部水生态足迹是本国水资源的水利用量; 外部水生态足迹是国家进口的产品和服务中所需要的来自其他国家的用水量。A. K. Chapagain 等^[9]对棉花消费的水生态足迹进行了计算, 研究范围涵盖整个棉花消费过程, 包括棉花原料消费和棉花产品消费, 从而提出稀释水的概念, 以此来量化棉花消费对水质的影响。通过对国家水生态足迹的量化, Chapagain 和 Hoekstra^[35]逐步完善了水生态足迹的概念, 也分别计算了内部水生态足迹和外部水生态足迹。发现有 4 个因素会直接影响国家的水生态足迹, 分别是消费量、消费形式、气候条件和农业方式。以往对于水资源的评价都是从生产角度出发的, 而水生态足迹是从消费角度进行的^[9]。它是从各国对水资源的消费的来源来评价水资源的可持续性和利用效率。很多缺水国家缓解水压力的措施就是将水资源外部化, 即增加外部水生态足迹。同时, 水生态足迹也是评价国家水资源独立性的指标, 从外部水生态足迹和内部水生态足迹方面, 每个国家都从国际贸易中获得或支出了虚拟水, 在水资源方面各个国家都对其他国家有不同程度的依赖, 体现出建立健康、公平的国际市场的重要性。

国内的学者也对水生态足迹进行了研究, 龙爱华等^[37]总结了水生态足迹的概念和计算方法, 核算并分析了甘肃省 2000 年的虚拟水消费和水资源足迹。结果表明, 2000 年甘肃省全社会的水资源足迹为 221. 231 亿 m^3 , 人均水足迹为 865. 24 $\text{m}^3/(\text{人}\cdot\text{年})$ 和 2 371 $\text{L}/(\text{人}\cdot\text{d})$, 大大高于统计的水资源利用量。还有学者利用水足迹和虚拟水的概念, 计算了我国及各区域主要农产品的虚拟水含量, 通过分析区域的农产品生产和消费关系, 计算了我国国际和国内区域间的虚拟水流量, 以及相应的水足迹和水的自给率, 并进行了相关分析^[38]。计算结果表明, 中国是一个水资源高度自给的国家, 但区域间差别较大。绿色水在我国国内总用水中占据了较大份额, 对于我国农业生产意义重大。

3.5 虚拟水的量化 通过对虚拟水量的计算, 可以得出人类活动实际消耗的水资源数量。农作物产品

虚拟水含量具体的计算根据不同的产品分类而各有差异,Zimmer 和 Renault^[39] 等将农作物产品类型分为初级产品、加工产品、副产品及非耗水产品 4 种主要类型。动物产品的虚拟水含量主要依赖于动物类型、饲养结构和动物成长的自然环境条件, 计算比较复杂。一般采用 Chapagain 和 Hoekstra 提出的产品“生产树”(Production Tree) 的方法进行计算^[40]。Singh 等^[40] 计算了 Gujarat 范围内不同地区作物的产量以及其虚拟水的含量, 并从农业和经济两个方面评估了作物灌溉用水效率。在对茶和咖啡产品所产生的水生态足迹进行研究中发现, 一杯咖啡的虚拟水含量为 140L, 而一杯茶的虚拟水含量为 34L, 荷兰在 1995~ 1999 年期间茶和咖啡的贸易中产生了大量的虚拟水量流动^[30]。

在国内, 曹建廷等^[41] 对农畜产品中虚拟水含量的计算方法进行了总结, 揭示了虚拟水对于提高水资源利用效率方面和制定水资源政策方面的作用。王红瑞等^[42] 对中国畜产品中的虚拟水含量分省市进行了分析和研究, 计算出中国各省市畜产品虚拟水含量历年的变化情况及各类畜产品现状分布情况, 并与各地的水资源总量进行对比分析。并且利用实际灌溉定额法及全国作物需水量等值线图 and 投入产出方法分别对北京市农业虚拟水结构变化以及北京市的水资源与产业结构优化进行了研究^[43,44]。通过对农作物产品中的虚拟水含量与 ET 之间关系的研究, 王树谦等^[45] 得出 ET 减少会导致虚拟水量的减少的结论, 提出了农业结构战略性的调整和区域水资源管理的有效措施和建议。利用投入产出分析方法, 计算得到了 2002 年宁夏虚拟水的输出量和经济社会系统对水资源的消费利用情况, 说明宁夏采用虚拟水战略进行更大尺度的水资源配置还面临着很多问题和困难^[46]。姚蓝^[47] 对动植物的虚拟水进行了分析, 对我国西北 4 省的粮食、油料和棉花等农作物中虚拟水的含量进行了计算, 还利用数据包络分析 (DEA) 对 8 个国家的虚拟水状况进行了分析。项学敏等^[48] 在总结和归纳动植物虚拟水含量计算的基础上, 提出了工业产品虚拟水的计算方法, 以辽河油田为例, 计算了石油制品的虚拟水含量, 从水资源的角度提出了石油行业未来应采取的政策。

4 虚拟水研究展望

(1) 虚拟水是实体水资源概念在经济社会领域中的拓展。在以往的研究中, 对于水循环的理解仅仅停留在自然水循环方面也就是实体水方面, 随着虚拟水研究的拓展, 可以将虚拟水循环加入到自然实体水循环中并扩展水资源的内涵, 即将水资源的社会部分加入到传统的水资源概念中。在今后的研究中, 不仅要阐述实体水的流动与循环状况, 更要描述出虚拟水的流动与循环, 这对于全面的理解和研究水资源, 阐述水资源背后的经济、环境效益是非常重要的。(2) 虚拟水的量化是虚拟水研究的又一重要方面。农作物生长所消耗的水资源会受到当地气候条件的影响, 从微观方面考虑, 在计算区域虚拟水含量的过程中根据气候条件从生长机理上进行量化, 通过模型根据不同地区情况调整气候参数准确计算各类作物虚拟水量, 这是虚拟水量化所面临的一大难题。从宏观方面考虑, 投入产出法是计算产品虚拟水的有力工具, 但该方法计算的准确性不高。进一步完善虚拟水的内涵和分类, 进一步明确蓝水虚拟水、绿水虚拟水、稀释虚拟水、淡水虚拟水和污水虚拟水的概念和计算方法都将逐渐成为未来研究的重点, 从而挖掘出虚拟水背后更加深层的生态与环境效益。(3) 虚拟水的实践过程会影响当地农业生产格局的结构, 以及相关政策的制定。对于缺水地区, 需要减少对于水密集型产品的生产, 将有限的水资源投入到耗水量少, 可产生经济价值高的产品生产中, 最大化的发挥水资源的利用价值。这就需要对生产格局和结构进行调整和优化。将基于虚拟水导向制订的政策联系起来, 根据当地的实体水与虚拟水情况, 制定出相应的贸易和生产政策, 缓解实体水资源压力, 保证食品安全和水安全, 解决地理政治纠纷甚至水资源“战争”, 也是当前值得开展的研究工作。(4) 水生态足迹更是未来研究的重点之一, 虚拟水是从进出口贸易方面提出的, 而水生态足迹是从整体角度来评价水资源的消耗。内部水生态足迹和外部水生态足迹将水资源消耗的来源分开, 计算出对国内水资源的消耗和国外水资源的依赖。从这种意义上看, 以虚拟水为基础的水生态足迹的研究更值得深入探索。通过水生态足迹, 可以将地区、国家乃至全球的虚拟水以动态的形式表示出来, 研究区域内和区域外的虚拟水流动情况。水生态足迹所产生的环境影响和经济成本主要是由消费者所引起的, 如何量化这种影响和成本, 将这种影响和成本通过价格

的方式转移到消费者、消费地区或国家层面,从消费角度来减少对水资源的消耗,这也是非常重要和十分有意义的。(5)当前的虚拟水贸易是将人口增长所带来的水压力向富水地区或国家转移,对于富水地区或国家来说虚拟水的流入与流出是非常不平衡的,这需要在现行的虚拟水贸易基础上综合考虑多方面的因素来改善这种情况,提高全球水资源的利用效率。M. Qadir^[1]认为虚拟水本身就包含农业、经济和政治3个方面。农业方面包括当地的气候条件、土壤特性、农作物特点等等;经济方面主要包括水资源的机会成本和贸易模式等,通常缺水国的水资源机会成本较高;政治方面涉及到国家安全、食品安全、就业情况等。在未来虚拟水贸易的研究中,不能仅仅从水资源的角度来考虑,需要综合考虑农业、经济和社会等几个方面,从国家和全球的角度出发提出一种平衡的虚拟水贸易方式。

参 考 文 献:

- [1] Qadir M, Boers Th M, Schubert S, Ghafoor A, Murtaza M. Agricultural water management in water-starved countries: challenges and opportunities[J]. *Agricultural Water Management*, 2003, (62): 165– 185.
- [2] Fishelson G. The allocation of the marginal value product of water israeli agriculture[A]. *Water and Peace in the Middle East*[C]. Amsterdam, Elsevier Science BV, 1994. 427– 440.
- [3] Bingsheng K, Pierre G. Water, Livestock and ecosystems[C]// FAO. *Water for food conference*. Netherlands: [s. n.], 2005.
- [4] 罗贞礼,黄璜,等.郴州市农产品虚拟水的量化分析[J]. *湖南农业大学学报*, 2004, 30, (03): 282– 284.
- [5] 柳长顺,陈献,等.虚拟水交易:解决中国水资源短缺与粮食安全的一种选择[J]. *资源科学*, 2005, 27(3): 10– 15.
- [6] Ohlsson L. The tuning of a screw: social resource scarcity as a bottle-neck in adaptation to water scarcity[J]. *Stockholm Water Front*, 2000, (1): 10.
- [7] Allan J A. A Convenient Solution[J]. *The UNESCO Courier*, 1999, 52(2): 29– 31.
- [8] 龙爱华,徐中民,张志强.虚拟水理论方法与西北4省(区)虚拟水实证研究[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(4): 577– 584.
- [9] 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): 186– 203.
- [10] Dabo Guan, Klaus Hubacek. Assessment of regional trade and virtual water flows in China[J]. *Ecological Economics*, 2006, 2(22): 1– 12.
- [11] 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, 20(3): 260.
- [12] 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.
- [13] 柳文华,赵景柱,邓红兵等.水—粮食贸易:虚拟水研究进展[J]. *中国人口资源与环境*, 2005, 15 (3): 129– 134.
- [14] 王红瑞,董艳艳,王军红,等.关于虚拟水与虚拟水贸易的讨论[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2006, 42 (6): 633– 638.
- [15] Lma C L. Commentary: “Virtual water and Occam’s Razor by Stephen Merreux and” virtual water—the water, food and trade Nexus: useful concept or misleading metaphor by pony allan[J]. *Water International*, 28(1): 11– 13.
- [16] Allan J A. Overall perspectives on countries and regions. In Rogers P, Lydon P. edits. *Water in the arab world: perspectives and prognoses*[M]. Massachusetts: Harvard University Press, 1994.
- [17] Allan J A. Virtual water—the water, food, and trade nexus useful concept or misleading metaphor? [J]. *Water International*, 2003, 28 (1): 106– 113.
- [18] Greenaway F, Hassan R, Reed G V. An empirical analysis of comparative advantage in egyptian agriculture[J]. *Applied Economics*, 1994, (26): 649– 657.
- [19] El-Serafy S. The agricultural sector in the context of Egypt’s structural adjustment program. In: Faris M A, Khan M H (Eds), *Sustainable Agricultural in Egypt*[M]. Lynne Rienner Publisher, Boulder, CO. 1993.
- [20] Wichelns Dennis. The role of the“ virtual water” in efforts to achieve food security and other national goals, with an example

- from Egypt[J] . Agricultural Water Management, 2001, (49) : 131– 151.
- [21] Wichelns Dennis. The policy relevance of virtual water can be enhanced by considering comparative advantages[J] . Agricultural Water Management, 2004, (66) : 49– 63.
- [22] Hoekstra A Y, Hung P Q. Globalization of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade[J] . Global Environmental Change, 2005, (15) : 45– 56.
- [23] Dinesh Kumar M, Sign O P. Virtual water in global food and water policy making: is there a need for rethinking? [J] . Water Resources Management, 2005, (19) : 759– 789.
- [24] Hong Yang, Alexander L J B Zehnde. Water scarcity and food import: a case study for southern mediterranean countries [J] . World Development, 2002, 30(8) : 1413– 1430.
- [25] 柳长顺, 陈献, 刘昌明, 等. 虚拟水交易: 解决中国水资源短缺与粮食安全的一种选择[J] . 资源科学, 2005, 27(2) : 10– 15.
- [26] 马静, 汪党献, Hoekstra A. Y. 虚拟水贸易与跨流域调水[J] . 中国水利, 2004, (13) : 37– 39.
- [27] 徐中民, 龙爱华, 张志强. 虚拟水的理论方法及在甘肃省的应用[J] . 地理学报, 2003, 58(6) : 861– 869.
- [28] Allan J A, Jennifer C O. Politics, economics and (virtual) water: A discursive analysis of water policies in the Middle East and North Africa[J] . Research in Middle East Economics, 2003, 5(1) : 53– 78.
- [29] Wang Hongrui, Liu Xinghan, Dong Yanyan, Wang Junhong. Analysis of China's water security and virtual water trade [J] . Chinese Journal of Population, Resources and Environment, 2006, 14(4) : 11– 19.
- [30] Chanpagain A K, Hoekstra A Y. The water needed to have the Dutch drink tea[A] . Value of Water Research Report Series No. 15[C] . Netherlands, Delft: UNESCO-IHE Institute for Water Education, 2003.
- [31] 秦丽杰, 邱红, 陶国芳. 粮食贸易与水资源安全[J] . 世界地理研究, 2006, 15(1) : 44– 49.
- [32] 严晓玲, 刘茂祥, 陈维哲. 三江平原的虚拟水战略与经济的分析[J] . 现代化农业, 2006, (2) : 8– 10.
- [33] 崔亚楠. 虚拟水理论与北京地区用水结构分析[J] . 中国水利, 2005(4) : 33– 35.
- [34] 王红瑞, 董艳艳, 王军红, 等. 北京市农作物虚拟水含量分析[J] . 环境科学, 2007, 28(11) : 632– 637.
- [35] Hoekstra A Y, Chanpagain A K. Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern[J] . Water Resource Management, 2007, (21) : 35– 48.
- [36] Hoekstra A Y, Hung P Q. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade[C] . Value of Water Research Report Series No. 11, IHE, Delft, The Netherlands, 2003. 24– 26.
- [37] 龙爱华, 徐中民, 张志强, 等. 甘肃省 2000 年水资源足迹的初步估算[J] . 资源科学, 2005, 27(3) : 123– 129.
- [38] 马静, 汪党献, 来海亮, 等. 中国区域水足迹的估算[J] . 资源科学, 2005, 27(5) : 96– 100.
- [39] 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.
- [40] Sing O P, Amrita S, Rahul S, et al. Virtual water trade in dairy economy irrigation water productivity in Gujarat[J] . Economic and Political Weekly, 2004, 39(31) : 3492– 3497.
- [41] 曹建廷, 李原园, 张文胜, 等. 农畜产品虚拟水研究的背景、方法及意义[J] . 水科学进展, 2004, 15 (16) : 829– 834.
- [42] 王红瑞, 王军红. 中国畜产品的虚拟水含量[J] . 环境科学, 2006, 27(4) : 609– 615.
- [43] 王红瑞, 王岩, 王军红, 等. 北京农业虚拟水结构变化及贸易研究[J] . 环境科学, 2007, 28(12) : 220– 227.
- [44] 王岩, 王红瑞. 北京市的水资源与产业结构优化[M] . 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [45] 王树谦, 梁灵君. 浅析 ET 与农作物产品虚拟水之间的关系[J] . 水科学与工程技术, 2005, (6) : 26– 29.
- [46] 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.
- [47] 姚蓝. 动植物虚拟水分析及虚拟水贸易[D] . 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2006.
- [48] 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.

Progress of study on theory and method of virtual water

WANG Hong-rui¹, HAN Zhao-xing², HAN Li-jie¹, HE Li-juan³

(1. *Institute of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;*

2. *School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;*

3. *School of Languages and Literatures, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)*

Abstract: Virtual water is an expansion of the real water resources conception in the society. It is one of the hot topics at present. After an introduction of the virtual water and its related concepts, this paper summarizes the progress of studies on the theory and method of virtual water in China and abroad. The status can be generalized as in 5 aspects, i. e., virtual water theory, virtual water trade and food security, virtual water strategy, eco-water footprint and quantification of virtual water. The authors foresee some future research topics. It is thought that the expansion of real water resource conception, quantification of virtual water, policy-making based on virtual water theory, eco-water footprint and virtual water trade balance would be the 5 key points of research in future.

Key words: virtual water; virtual water trade; virtual water strategy; eco-water footprint

(责任编辑: 王成丽)

(上接第 50 页)

Study on diversion angle effect on lateral intake flow

YANG Fan

(*Department of Hydraulics, IWHR, Beijing 100038, China*)

Abstract: The diversion angle effect on lateral intake flow in open channels, which is defined as the diversion angle effect, was studied by means of theoretical analysis, laboratory flume experiment and numerical simulation. It is demonstrated that the variation of the diversion angle has a significant influence on the intake flow characteristics. The study results show that with decreasing of the diversion angle from 90° to 30°, the intake flow is getting more uniform at the entrance section; the relative diversion width of the main flow upstream of the intake is reducing; the net inflow width in the intake is becoming larger; the streamlines are appearing more smooth in the diversion region; and more sediment can be guided away far from the intake.

Key words: diversion angle effect; lateral intake flow; sediment control; numerical simulations

(责任编辑: 李福田)