

# 虚拟水研究进展

杨志峰, 支 援, 尹心安

(北京师范大学环境学院, 北京 100875)

**摘要:**在解析虚拟水、水足迹等概念内涵的基础上,系统地梳理了产品虚拟水核算、区域虚拟水贸易评估、虚拟水变化机制 3 个领域的研究进展。产品虚拟水核算中重点分析了中间产品和最终产品虚拟水计算方法,并对国家、行政区及流域尺度的虚拟水核算案例进行了简要分析;区域虚拟水贸易评估中分析了自上而下和自下而上两类方法的使用情况;虚拟水变化机制分析中综述了结构分解分析等多种驱动力分析方法。在总结研究进展基础上,讨论了目前研究中值得进一步深入探索与完善的问题,展望了虚拟水未来的重点研究方向,包括虚拟水核算模型精度改进、价格杠杆对虚拟水的影响、虚拟水水量与水质联合评价体系以及虚拟水战略实践与优化方案改进等。

**关键词:**虚拟水;水资源;水足迹;研究进展

**中图分类号:**TV213.4

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7647(2015)05-0181-10

**Research advances in virtual water**//YANG Zhifeng, ZHI Yuan, YIN Xin'an(*School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

**Abstract:** Based on analysis of the concept of virtual water and the water footprint, this paper systematically reviews the latest achievements in the three fields of calculation of virtual water of product, regional virtual water trade assessment, and the changing mechanisms of virtual water. In the section on calculation of virtual water of product, the papers electively analyze the virtual water calculation method of the intermediate product and final product, and briefly analyze virtual water calculation cases at national, administrative region, and catchment scales. In the section on regional virtual water trade assessment, the paper analyzes the service condition of two methods, the method moving from top to bottom and the method moving from bottom to top. In the section on the changing mechanisms of virtual water, the paper summarizes several driving force analytical methods, such as structural decomposition analysis. Based on the summary of research advances, the paper discusses problems deserving further exploration and proposes research directions for virtual water in the future, including accuracy improvement of the virtual water calculation model, the effect of price leverage on virtual water, acombined evaluation system for the volume and quality of virtual water, and improvement of the strategy forand optimization of virtual water.

**Key words:** virtual water; water resources; water footprint; research advances

水资源是基础性的自然资源,是生态环境的一种控制性因素,同时也是战略性的经济资源,是国家和地区综合实力的有机组成部分<sup>[1]</sup>。人类活动离不开水资源,水资源的合理开发和充分利用,关系到人类发展的切身利益。全世界人口增长、城市化进程推进、经济活动总体不断增长以及随之而来的大量用水和水生态环境破坏,使得水资源紧缺问题日益凸显。水资源短缺正成为制约区域经济社会发展的瓶颈问题。目前全球 43 个国家共约 7 亿人正面临着水资源短缺的问题<sup>[2]</sup>。解决水资源短缺问题,

主要有 2 种方法:一种是从实体水资源角度出发,利用水资源分配政策规划、水利工程调水、海水淡化、污水回用、改进用水效率等手段实现水资源的开源节流及再分配;另一种是通过商品贸易实现虚拟水的调度。研究表明,实体水的增加供应、优化分配和节约使用等手段尚不能完全解决缺水地区的用水问题,还需要从虚拟水的角度配合解决<sup>[3-4]</sup>。因此,对虚拟水展开研究,探索、建立和发展相关原则和方法来指导虚拟水的合理调度,对水资源的可持续分配和使用显得尤为重要。本文将解析虚拟水及其相关

基金项目:国际科技合作计划(2011DFA72420);国家自然科学基金创新研究群体项目(51421065);国家自然科学基金(51439001)

作者简介:杨志峰(1963—),男,河北辛集人,教授,博士,主要从事湿地生态过程、流域生态环境需水、城市生态规划与管理研究。E-mail: zfyang@bnu.edu.cn

概念的内涵,明晰不同类型虚拟水的核算方法,并在系统梳理国内外虚拟水研究进展的基础上,展望未来研究发展趋势,以期推动虚拟水研究的进一步深化。

## 1 虚拟水及相关概念

虚拟水(virtual water)概念由 Allan<sup>[5]</sup>提出,用以描述生产产品或服务过程中消耗的水资源量。虚拟水与真实意义上的水并不相同,它是指产品生产过程中消耗的水,以虚拟的形式包含在产品中,又称体现水、嵌入水、看不见的水。例如,生产1 kg 苹果需要消耗822 L 水,则1 kg 苹果的虚拟水含量为822 L<sup>[5-10]</sup>。虚拟水概念的提出,为解决水资源短缺问题提供了新的研究视角:①虚拟水丰富和拓展了传统水资源的观念,有利于在经济全球化、管理集中联合化的背景下评估水资源利用情况、破解水资源的制约问题;②虚拟水可以更好地把经济活动和水资源承载能力纳入统一的研究体系,对协调水资源配置格局与经济发展格局具有战略指导意义;③虚拟水依托于经济贸易中的产品和服务,更加强调市场在资源配置中的重要作用,有利于通过成本效益驱动改变传统的用水模式、用水习惯和用水理念,实现水资源利用效率的长远优化。

随着虚拟水研究日益深入,研究领域不断扩大,与虚拟水相关的概念也随之产生,如单位价值产品虚拟水含量、虚拟水进口量和出口量、虚拟水流动等。在虚拟水研究基础上,Hoekstra 等<sup>[11-12]</sup>类比生态足迹的概念,提出了水足迹概念,它是指一个地区的人们消费的产品和服务中所包含的全部直接和间接的水资源量(即这些产品和服务所蕴含的虚拟水)。水足迹概念可用于评价区域的水资源承载能力以及对外的依赖程度,描述水资源安全情况。Hoekstra 等<sup>[13]</sup>进一步深化了水足迹的概念,将其划分为绿水足迹、蓝水足迹与灰水足迹:绿水足迹是生产过程中(主要指农产品)消耗的土壤中的雨水量;蓝水足迹指在产品或服务生产过程中消耗的地表水与地下水量;灰水足迹是指将商品和服务生产过程中所排放的污水稀释、消解到某一水质标准所需要投入的水资源量。据此,有研究者也提出了与之相似的绿色虚拟水、蓝色虚拟水和灰色虚拟水的概念<sup>[14]</sup>。可以看出,水足迹与虚拟水概念的含义相近,很多情况下产品水足迹和产品蕴含的虚拟水可以换用,人们在研究区域内生产和消费活动对水资源的消耗时,常使用水足迹这一概念;而在研究跨区域消费和贸易中蕴含的水资源消耗行为时,常采用虚拟水这一概念<sup>[15-20]</sup>。

在水资源利用的定义方面,虚拟水和水足迹描

述的都是产品和服务生产过程中的耗水量,而非用水量。用水量(水资源的使用量)与耗水量的含义不同:前者是指分配给一定区域内用户的水量;后者是指用水量在用水过程中,通过居民和牲畜饮水、土壤吸收、蒸发蒸腾、管网损失、随产品带走等多种途径消耗掉而不能返回到地表或地下水体的水量<sup>[21]</sup>。在水资源规划、配置和管理工作中,衡量、评价区域水资源供给能力时,经常需要比较用水量与区域可供水量(指各种水源工程可为用水户提供的水量)是否匹配、是否能够实现水资源的可持续利用<sup>[21-23]</sup>。Morillo 等<sup>[24]</sup>据此指出,从供需角度分析用水量与可供水量,将全部用水量纳入虚拟水计算很有必要,因为用水量的相当一部分难以在供水区域内再次被利用,只考虑耗水量而不考虑用水量可能造成对用水情况的低估,这一研究角度对水资源压力大、供水能力有限的缺水区域尤为关键。Morillo 等<sup>[24]</sup>扩展了虚拟水的定义,在其研究中将虚拟水视为在产品或服务生产过程中的用水量而非耗水量。因此,在虚拟水的研究中,可以根据研究、规划的实际需求和不同目的,选择调整虚拟水的含义范围。

## 2 虚拟水研究进展

目前国内外有关虚拟水的研究主要围绕产品虚拟水核算、区域虚拟水贸易评估、虚拟水变化机制分析3个方面开展。

### 2.1 产品虚拟水核算

虚拟水核算的研究对象既可以是生产链中的某一中间产品或最终产品所含的虚拟水,也可以是消费者或生产者所消费或产出的所有产品所含的虚拟水,还可以分析不同空间尺度研究区(如产业园区、流域、地区、行政区、国家或者全球)和不同时间范围内的虚拟水(表1)。

在方法层面,不同的虚拟水概念具有相应的虚拟水核算方法。因为农业往往是经济系统中耗水最多的部门,而农业生产耗水主要是植物蒸腾,因此核算农产品虚拟水的研究利用农学、植物学公式计算植物蒸腾水量或实地测量植物的蒸腾量作为农产品所含的虚拟水<sup>[7,9,25]</sup>。Zhao 等<sup>[26]</sup>开发了利用地理信息系统计算和预测农产品虚拟水的方法,并预测了中国2030年、2050年及2090年的水稻、小麦和玉米的虚拟水含量。Morillo 等<sup>[24]</sup>扩展了农产品虚拟水的范围,认为土地整理、除霜等农艺措施的用水也应当计入农产品虚拟水含量中。这类核算方法主要考虑农业生产中的直接用水,忽略了产业链上中间产品(供应给其他生产者的产品)的虚拟水。例如根据虚拟水的定义,农业生产中所使用的化肥、农药

表 1 部分产品虚拟水核算研究

| 研究者与发表年份                                   | 研究对象           | 时间尺度        | 空间尺度              |
|--------------------------------------------|----------------|-------------|-------------------|
| Chapagain 等 <sup>[7]</sup> (2003)          | 畜产品虚拟水含量       | 1995—1999 年 | 美国、加拿大等 11 个国家    |
| Zimmer 等 <sup>[28]</sup> (2003)            | 农产品和畜产品虚拟水含量   | 1989—1999 年 | 埃及、中国等 18 个国家和地区  |
| Chapagain 等 <sup>[36]</sup> (2004)         | 农业和工业虚拟水含量     | 1997—2001 年 | 美国、中国等 209 个国家和地区 |
| 王红瑞等 <sup>[29]</sup> (2006)                | 畜产品虚拟水含量       | 1985—2002 年 | 中国                |
| Liu 等 <sup>[30]</sup> (2007)               | 农产品虚拟水含量       | 1995—2004 年 | 中国、美国等 102 个国家    |
| 赵旭等 <sup>[41]</sup> (2009)                 | 农业、工业和服务业虚拟水含量 | 2002 年      | 中国                |
| Zhao 等 <sup>[40]</sup> (2010)              | 农业、工业和服务业虚拟水含量 | 1997—2002 年 | 中国海河流域            |
| Chapagain 等 <sup>[50]</sup> (2011)         | 水稻虚拟水含量        | 2000—2004 年 | 美国、中国等 33 个国家和地区  |
| Mekonnen 和 Hoekstra <sup>[47]</sup> (2011) | 农产品虚拟水含量       | 1996—2005 年 | 美国、中国等 211 个国家和地区 |
| Mekonnen 和 Hoekstra <sup>[48]</sup> (2012) | 畜产品虚拟水含量       | 1996—2005 年 | 美国、中国等 211 个国家和地区 |
| Yang 等 <sup>[60]</sup> (2012)              | 农产品和畜产品虚拟水含量   | 1995—1999 年 | 西欧、中亚等 13 个地区     |
| Cazcarro 等 <sup>[33]</sup> (2014)          | 旅游业虚拟水含量       | 2004 年      | 西班牙               |
| Huang 等 <sup>[27]</sup> (2014)             | 玉米、小麦和番茄虚拟水含量  | 1991—2010 年 | 北京                |
| Li 等 <sup>[34]</sup> (2014)                | 博彩业虚拟水含量       | 2005—2011 年 | 中国澳门              |
| Manzardo 等 <sup>[53]</sup> (2014)          | 造纸业虚拟水含量       | 2011 年      | 美国、巴西、智利          |
| Zhang 等 <sup>[42]</sup> (2011)             | 水稻虚拟水含量        | 2007 年      | 中国                |
| Zhao 等 <sup>[72]</sup> (2014)              | 水稻、小麦和玉米虚拟水含量  | 1961—2090 年 | 中国                |
| Zhi 等 <sup>[54]</sup> (2014)               | 农业、工业和服务业虚拟水含量 | 2002—2007 年 | 中国海河流域            |
| Dalin 等 <sup>[9]</sup> (2015)              | 农产品和畜产品虚拟水含量   | 2005—2030 年 | 中国                |
| Morillo 等 <sup>[24]</sup> (2015)           | 草莓虚拟水含量        | 2010—2012 年 | 西班牙韦尔瓦省省          |

的生产所使用的水资源,也应当计入农产品的虚拟水中<sup>[13]</sup>。由于农业自身的用水量远大于这些中间产品的用水量,对农业虚拟水的研究可以近似地忽略中间产品的虚拟水。但是,分析工业和第三产业的产品和服务的虚拟水含量时,由于工业和第三产业各部门之间用水差距不像农业和其他部门的用水差距那么大,蕴含在其中间产品的虚拟水并不像农业部门那样远小于生产过程中的直接用水量,因此对于工业和第三产业而言,有必要对中间产品所含的虚拟水进行核算。

目前定量研究中间产品和最终产品(供应给消费者的产品)所含虚拟水的方法主要有两类,分别是以生产树法为代表的自下而上的方法和以投入产出法为代表的自上而下的方法<sup>[8,18,27]</sup>。生产树法主要用于计算特定生产部门的产品水足迹,它是将最终产品生产链上的各个环节用水进行统计与累加<sup>[13,28-31]</sup>。例如,对于第三产业来说,其直接耗水与农业相比相对较小,但第三产业服务的提供需要使用大量工农业中间产品,间接拉动了水资源的使用<sup>[32-34]</sup>。生产树这类自下而上的方法需要供应链上详细的产品和服务数据,能够详细地反映某一部分门或企业各个生产环节的用水情况,而忽略了部分产业部门间的网络作用关系。因此这类自下而上的方法主要用于分析某一重要部门或企业的虚拟水,而在同时核算多个产业部门的产品虚拟水时,会产生用水责任划定不清、漏算或重复计算的风险,特别是难以分析“机械制造业为电力部门提供机械,电力部门又为机械制造业提供电力”这种循环式供应

关系中的虚拟水流动情况<sup>[35-36]</sup>。

以投入产出法为代表的自上而下的方法,是在全面核算多个产业部门最终产品的虚拟水含量(水足迹)时常用的研究方法。投入产出方法由 Leontief<sup>[37]</sup>提出,利用国民经济投入产出表来分析产业网络中各部门之间直接和间接的诱发效果,可以计算所有直接、间接地包含于产品消费中的资源使用<sup>[38-43]</sup>。自上而下的方法与自下而上的方法相比,虽然不能提供某一部分门具体各个生产环节的用水情况,但能够全面分析互相关联的多个产业部门各自的虚拟水情况,准确划分用水责任,漏算或重复计算的风险低。该类方法依赖于建立全面的部门原料与产品输入与输出网络数据,常需要依托于生产网络建模、投入产出统计等前期工作。有部分研究对投入产出法进行了拓展<sup>[19,44-46]</sup>,提出了利用混合投入产出法计算各部门输入的中间产品水足迹,更加清晰地描述了部分中间产品与最终产品的虚拟水关系。陈锡康等<sup>[39]</sup>认为投入产出法只考虑了各部门的投入与产出,而没有考虑占用的部分,据此提出了投入占用产出法,此方法将占用品的虚拟水也进行了计算。

在实践应用层面,特定产品虚拟水含量的核算,是近年来国际上虚拟水研究的重要内容。目前全球农、林、畜产品及其衍生产品的虚拟水核算已经较为完备,部分工业产品和第三产业服务的虚拟水也有研究。Mekonnen 等<sup>[47-48]</sup>核算了 1996—2005 年间全球 126 种主要农业作物及其衍生产品的虚拟水含量,以及 1996—2005 年全球 8 种主要畜产品的虚拟



水含量。也有研究针对性地核算了某一种或几种特定农产品的虚拟水含量及其构成,以及部分农业制品的虚拟水含量<sup>[7,49-51]</sup>。这些研究表明,农产品中绿色虚拟水大致占虚拟水总量的 70% 以上,畜产品则以蓝色虚拟水为主;单位价值的农产品虚拟水含量普遍低于畜产品。Gerbens-Leenes 等<sup>[52]</sup>计算了全球 80% 的以农作物为原料的生物燃料虚拟水含量。上述研究未考虑农业生产中的虚拟水投入,如农机、农药等。Zhang 等<sup>[25]</sup>在核算 2007 年中国农产品虚拟水含量时在投入产出法基础上加入了对农业生产中虚拟水投入的核算,使核算更加全面。Morillo 等<sup>[24]</sup>在核算西班牙草莓的虚拟水含量时也把农业生产的虚拟水投入纳入了产品虚拟水的核算范围。

工业和第三产业产品、服务的虚拟水核算方面,Mekonnen 等<sup>[47]</sup>用生产树法核算了 1996—2005 年间全球工业虚拟水含量,认为灰色虚拟水的比例远大于蓝色虚拟水。而 Zhao 等<sup>[8]</sup>提出了基于投入产出法的水足迹计算方法,并利用 2002 年中国投入产出表计算了当年中国所有产业部门的产品虚拟水含量,发现考虑了中间产品的虚拟水后,工业和第三产业中蓝色虚拟水的含量均明显上升,因为它们接收了农业中间产品中蕴含的大量蓝色虚拟水。工业和第三产业产品和服务的虚拟水核算在多个国家或地区的不同产品和服务中都得到了应用。例如,Zhang 等<sup>[42]</sup>核算了中国 2002 年和 2007 年的各产业部门产品的虚拟水含量,发现 2007 年各部门产品虚拟水含量低于 2002 年,说明用水效率总体提高;Manzardo 等<sup>[53]</sup>用生产树法核算了巴西、智利和美国造纸业产品中的虚拟水含量,认为提高造纸生产过程中化工原材料的使用效率对节约用水意义重大;Li 等<sup>[34]</sup>利用生产树法和投入产出法的混合方法分析了澳门服务业中博彩业的虚拟水含量,认为除了提高直接用水效率外,控制博彩业中虚拟水使用同样有助于缓解澳门缺水的压力。

产品虚拟水核算常在国家或行政区域尺度上开展,这是因为政府等管理者和统计部门往往是在国家或行政区域尺度上开展管理和统计工作,这些层面与虚拟水核算相关的基础数据(产业部门用水数据、行业生产数据、进出口数据等)易于取得。随着虚拟水研究方法的日益发展,以及流域水资源管理的地位不断提升,越来越多的虚拟水研究在流域尺度进行<sup>[40,54]</sup>。流域是水资源的重要存在形式,也影响着产业的布局。从流域尺度进行虚拟水核算,能够定量描述流域内生产和消费活动对水资源的消耗,为判断水资源的利用量是否处于流域供给能力范围内提供了定量依据。流域尺度的虚拟水研究与

行政区域尺度的虚拟水研究相比,更符合水资源的自然属性,具有独到的优势<sup>[55]</sup>。陈锡康等<sup>[39]</sup>编制了 1999 年中国九大流域水利投入占用产出表,得出中国大部分水资源用于农业,1999 年中国农业虚拟水占总虚拟水的 70% 左右;水资源较为充足的东南诸河流域、珠江流域、长江流域和西南诸河流域的产品虚拟水含量普遍大于水资源较为缺乏的海河流域、内陆河流域和淮河流域。Schendel 等<sup>[56]</sup>根据加拿大 Fraser 河流域和 Okanagan 河流域的农业与气候数据研究了两流域的虚拟水情况,并与加拿大全国平均产品虚拟水含量进行了对比,认为流域尺度的虚拟水研究比国家尺度具有更高的精确度,更适用于作为区域或流域水资源管理的参考。Zhao 等<sup>[40]</sup>利用区域投入产出表生成(generating regional input-output tables,GRIT)方法克服了流域尺度缺少投入产出统计数据限制,将投入产出法应用于流域虚拟水核算,研究了 1992—2002 年海河流域的水足迹状况,得出流域的总虚拟水中,超过 90% 为农业虚拟水,各部门产品虚拟水含量均低于全国平均水平,即用水效率高于全国平均水平。Zhi 等<sup>[54]</sup>对海河流域 2002—2007 年的虚拟水研究也应用了类似方法。Wu 等<sup>[57]</sup>根据政府部门统计和非政府组织统计的数据,利用一般均衡(computable general equilibrium,CGE)模型计算了中国第二大内陆河——黑河流域 2003—2008 年的主要产业部门虚拟水含量,认为除地理条件外,不科学地农业灌溉加剧了该流域水资源压力,建议加强流域综合管理和产业结构升级,以实现水资源可持续利用。

## 2.2 区域虚拟水贸易评估

区域虚拟水是发生在该区域的所有过程涉及的虚拟水总和<sup>[13]</sup>。它包括来自本地水资源的虚拟水使用和进口调入的虚拟水。来自本地水资源的虚拟水使用包括生产用于居民和政府消费、固定资本形成、出口调出这几项用途的产品和服务过程中所使用的水资源,而进口调入的虚拟水则等于生产进口调入产品所消耗的水资源。总体来看,核算方法同样可以分为自上而下和自下而上的方法。其中,自上而下的方法是从产品生产角度计算区域虚拟水,本地产品的虚拟水等于区域内部的农业、工业和第三产业的生产耗水量,进口调入的虚拟水则等于其产地生产这些产品的耗水量<sup>[18]</sup>。自下而上的方法则是从产品消费的角度计算区域虚拟水,居民和政府消费、固定资本形成、出口调出、进口调入各项虚拟水含量都可以用该项用途的产品或服务的消费量乘以单位产品或服务的虚拟水含量而得出<sup>[8,41]</sup>。

虚拟水出口调出量与虚拟水进口调入量的差值

反映了一个区域虚拟水的总体流动状态;如果虚拟水出口大于进口,则该地区处于虚拟水净出口状态,即该地区总体上以虚拟水的形式向外界输出了水资源;若虚拟水出口小于进口,则该地区处于虚拟水净进口状态,即该地区总体上以虚拟水的形式从外界调入水资源<sup>[8,40]</sup>。

区域间的产品贸易与调动造成了虚拟水的流动。农产品等富含虚拟水的产品从水资源丰富的国家或地区向缺水国家或地区的流动,有助于帮助缺水地区节省生产用水、保障水安全、维护大尺度水资源平衡。Hoekstra 等<sup>[11]</sup>定量计算了 1995—1999 年全球 100 余个国家之间的虚拟水贸易,并在随后的一系列研究中对该项工作进行了扩充和完善<sup>[12-13,17]</sup>。研究表明,1995—2005 年间,全球范围内随产品贸易发生的虚拟水贸易量约为  $2.32 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{a}$ ,其中农产品及其衍生品虚拟水贸易量占 76%,据此指出区域间产品贸易与调动,特别是农产品贸易和调动引起的水资源流动应该引起重视<sup>[11]</sup>。Hoekstra 等<sup>[12,58]</sup>研究发现约旦、以色列等中东和北非国家地区的虚拟水净进口量较高,多数都在 40 亿  $\text{m}^3$  以上,认为这些国家和地区以虚拟水贸易的形式缓解了内部的水资源短缺问题;北美洲、南美洲、澳洲是主要虚拟水资源流出地区,非洲、东亚、欧洲地区是主要虚拟水流入地区。

众多研究者对全球或局部地区的虚拟水贸易进行了多种形式的核算,反映了众多国家或区域之间的虚拟水流动情况。Goswami 等<sup>[59]</sup>对中国和印度的虚拟水贸易进行了核算,认为在双边贸易中印度处于虚拟水净出口即出超状态,而中国处于入超状态。Yang 等<sup>[60]</sup>利用生态网络分析研究了 1995—1999 年全球尺度的农产品和畜产品虚拟水贸易,为区域贸易中的水足迹提供了多指标研究方法,认为生态网络分析有助于合理指导国际虚拟水贸易、保护水资源。Mao 等<sup>[61-62]</sup>利用生态网络分析研究了中国白洋淀流域内部的虚拟水流动情况,并提出通过生态修复、改进节水技术和提高水的重复利用率来进一步优化用水效率。Fracasso<sup>[63]</sup>采用引力模型研究了 145 个国家的虚拟水贸易,认为虚拟水的流动受到各国贸易水平、水资源禀赋、用水压力等因素影响。Zhao 等<sup>[64]</sup>结合贸易引力模型和投入产出法,分析了中国 2007 年各省区的虚拟水贸易情况,发现虚拟水贸易量占全国用水总量的 35%,而调水工程调动的实体水只占全国用水总量的 4.5%。马静等<sup>[65]</sup>研究认为,中国内部各地区的虚拟水流动中,东北地区、黄淮海地区及长江中下游地区是虚拟水净调出地区,而华北、华南和东南地区则是虚拟水净调入地区。Zhang 等<sup>[4]</sup>通过核算北京市虚拟水发

现,北京市对虚拟水调入的依赖度较高,维持虚拟水的调入量是维护北京市水资源安全的有效对策。

虚拟水战略是指缺水国家或地区通过贸易或调入方式,从水资源丰富的国家或地区购买虚拟水含量大(高耗水)的产品,以节省本地水资源,实现满足消费需求的同时保障水资源安全。虚拟水战略的概念首先由 Allan<sup>[5,15]</sup>、Zimmer 等<sup>[28]</sup>提出,Hoekstra 等<sup>[11,13]</sup>也对虚拟水战略进行了先行研究。以色列等中东缺水国家和地区较早实施虚拟水战略,对虚拟水战略的应用比较广泛<sup>[8,18,40]</sup>。Seekell 等<sup>[66]</sup>分析了全球虚拟水贸易,认为目前多数水资源丰富的国家没有充分利用其水资源禀赋,而缺水国家则过度开发利用了自身水资源;随着虚拟水战略越来越广泛地实施,这一不可持续发展情况将得到调节和改善。Weiss 等<sup>[67]</sup>总结了全球虚拟水战略有关研究,认为部分国家的虚拟水贸易虽然客观上实现了虚拟水战略的效果,但主观上缺乏虚拟水战略意识,部分国家的贸易有悖于虚拟水战略的思想,加剧了其水资源短缺的问题,为了进一步切实解决全球水资源问题,应当制定相应的虚拟水贸易规则,规范虚拟水贸易,而不能完全依赖现有的国际市场贸易秩序。

传统的虚拟水战略理论在解释经济学中的比较优势时可能会遇到问题,水资源丰富地区生产产品的用水效率可能比缺水地区生产同类产品的用水效率低,因为后者由于缺水的压力不得不提高用水效率。传统的虚拟水战略在分析时,可能得出用水效率高的产品应当鼓励出口的论断,这对于缺水地区是不现实的。Ridoutt 等<sup>[68]</sup>提出了稀缺虚拟水的概念,为虚拟水战略提供了新视角,产品的稀缺虚拟水等于生产地的取水指数(总取水量与水资源总量的比值)乘以产品虚拟水含量。稀缺虚拟水概念的提出,提高了贸易产品虚拟水的可比性,水资源丰富的地区生产产品的用水效率虽然可能比缺水地区生产产品的用水效率低,但对其本地的水资源造成的压力仍然相对较小,从平衡水资源的角度,应当鼓励水资源丰富的地区加大出口。Lenzen 等<sup>[46]</sup>对稀缺虚拟水的研究表明,虽然印度、美国、巴西、俄罗斯和印度尼西亚等国所消费的虚拟水总量较大,但从稀缺虚拟水的角度看,更缺水的国家(巴基斯坦、伊朗、埃及、阿尔及利亚和乌兹别克斯坦等)消费的稀缺虚拟水更多。Feng 等<sup>[69]</sup>对中国各省之间的稀缺虚拟水调动进行了研究,发现高度发达地区的消费严重依赖于新疆维吾尔自治区、河北省、内蒙古自治区等缺水地区的稀缺虚拟水输出,从而加剧了这些缺水地区的水资源短缺,据此建议合理实施虚拟水战



略,控制缺水地区的虚拟水输出。

### 2.3 虚拟水变化机制分析

虚拟水的变化机制分析是虚拟水研究中的重要内容之一。除了对产品的虚拟水含量及贸易进行核算之外,是什么因素影响着虚拟水的变化、各因素的影响力如何,是水资源管理关心的、也是值得探索的问题。Kondo<sup>[70]</sup>率先采用了结构分解分析(structure decomposition analysis,SDA)方法研究日本虚拟水变化,将变化驱动因素分为技术效应、产业结构效应和产量效应,计算结果得出日本的虚拟水使用总体上在向节约水资源的方向变化,主要是技术进步和产业结构调整的贡献,而出口商品不利于提高节水效率。Zhao等<sup>[40]</sup>采用迪氏(Divisia)分解法,将虚拟水变化的驱动因素分为用水强度的变化和消费量的变化,分析了海河流域1992—2002年的虚拟水变化,得出海河流域虚拟水使用量下降的主要驱动因素是用水强度的下降,而消费量的变化对虚拟水总量的影响较小。Zhang等<sup>[4]</sup>使用SDA法的改进方法——两极分解法对北京市1997—2007年的虚拟水变化进行了因素分解,该方法计算了各驱动因素在研究起始年和终止年的分解项的平均值,作为各因素对水足迹变化的独立贡献,计算精度比SDA法高;计算结果表明北京市的第三产业用水比例明显增加,主要是产量上升和产业结构调整的结果。李晓惠等<sup>[71]</sup>也通过两极分解法分析了江苏省虚拟水变动的影响因素,认为产品产量增加使虚拟水使用量上升,而产业结构调整 and 用水技术进步抑制了产业用水量的增加。Zhi等<sup>[54]</sup>利用加权平均分解模型建立了行政区及流域尺度的虚拟水变化驱动因素分解方法,并利用其分析了海河流域2002—2007年的虚拟水变化,证明了该方法的计算精度比两极分解法更好,并分析得出用水效率提高能够减小虚拟水总量,而生产规模的提高和产业结构的变动都促进了虚拟水总量增加。Zhao等<sup>[72]</sup>利用对数迪氏平均指数法(logarithmic mean Divisia index,LMDI)分析了中国1990—2009年的农业虚拟水总量的变化,该方法是另一种高精度的因素分解方法,结果显示农业虚拟水增加的最大原因是经济活动的变化,其次是人口效应,再次是饮食结构的调整。

## 3 虚拟水研究展望

虚拟水概念提出以来,其基本原理、计算方法和实践应用在全世界得到了蓬勃发展,帮助人们认识和理清了一些水资源使用与管理的现状和问题。然而,虚拟水研究在理论发展和实践应用过程中仍存在较多需要进一步深入探索与完善的问题,这些问

题也是未来的重点研究方向。

### 3.1 虚拟水核算模型精度改进

目前虚拟水的量化研究虽然很多,但其计算方法还存在一些问题。农产品虚拟水含量方面,很多研究由于缺乏相关的气象资料 and 用水资料,且测定农作物需水量的试验设备和技术条件比较落后,在实际计算中常采用多年平均值或通用参考值。但由于气候的空间和时间差异性,不同地区、不同年份干湿程度不同,即使同一种类作物的需水量也不同,因此计算出的农产品虚拟水含量可能存在较大误差。

从工业和第三产业虚拟水的计算方法来看,在生产过程中涉及的虚拟水含量计算是一个复杂的过程,生产工艺技术、生产规模与生产环境的差异都是造成虚拟水计算不精确的原因,因此即使虚拟水在各类工业和第三产业的产品和服务中的分配避免了漏算或重复,计算的最终结果也可能存在较大误差。未来研究应当继续提高计算方法的精确度,丰富考虑的因素类型,以得出更准确的虚拟水核算结果。

从对现有研究的回顾来看,不确定性存在于虚拟水核算的各个环节,数据和核算方法都存在一定程度的不确定性,而目前对不确定性的定量研究还比较少<sup>[73]</sup>。因此,定量识别虚拟水核算过程中不确定性的产生和传递,明确影响不确定性的因素及其控制办法,进而提升虚拟水核算结果的准确度和可靠性,是未来的重要研究方向之一。

从虚拟水的变化机制分析方法来看,目前的方法对虚拟水变化因素的识别还不够严谨。多数研究选择用水效率、产业结构和生产规模等作为主要因素进行分析,因素过少,导致分解分析过于简单笼统,对指导虚拟水战略的实践工作意义有限。而增加更具体的驱动因素(如人口、消费结构、人均消费水平、经济拉动效应等)时,需要对各因素进行共线性分析,剔除严重共线性的、无意义的因素,计算较复杂、工作量较大,不利于实践应用。由此,需要进一步发展合适的变化机制分析模型,对影响虚拟水变化的各种驱动因素进行更加精细准确地识别,并对各因素的作用进行分解分析。

此外,由于贸易统计数据的缺乏,各区域间的产品贸易量很多是通过历史数据或经济模型估算得出,而非实际调查取得,因此直接导致虚拟水总量计算结果出现偏差。Fracasso<sup>[63]</sup>、Zhao等<sup>[64]</sup>都认为引力模型等一些经济模型只是基于现实情况的经验性总结,其计算结果是对现实情况的近似描述,在有条件的情况下应尽量使用真实的调查统计数据。随着统计事业的不断发展,越来越多的区域生产及贸易统计数据能够被获取,并且部分虚拟水研究者已经着手

自行调查统计所需数据<sup>[57]</sup>。可以预见,未来研究中数据可得性对计算精确度的限制将进一步减小。

3.2 价格杠杆对虚拟水的影响研究

在市场经济活动中,生产者和消费者对于节水的态度,受到经济利益的重要影响。虚拟水贸易及节水技术的发展进步离不开市场机制的推动。价格机制是市场机制的核心之一,市场可以通过价值规律影响产业部门用水,政府也可以通过行政手段对水价进行调控,实现节水管理的宏观目标。水价对于用水效率、虚拟水贸易的调节效应影响如何、是否显著,目前的研究还不多见,需要进一步研究。通过实物型经济学模型和价值型经济学模型相结合,例如尝试将投入产出模型与均衡价格模型相结合,对水价和虚拟水的联系进行定量化研究,将是虚拟水研究的重要方向。

3.3 虚拟水的水量与水质联合评价体系

目前较多的虚拟水研究将绿色虚拟水、蓝色虚拟水、灰色虚拟水三者相加作为总虚拟水。但灰色虚拟水与绿色虚拟水和蓝色虚拟水不同,它实际上是对水体纳污能力的一种消耗,而非水量的消耗<sup>[13]</sup>,被污染的水资源经过稀释、降解等作用,短时间内又能够被重新利用;而绿色虚拟水和蓝色虚拟水是生产中蒸腾蒸发的水资源,是对水量的消耗,很难在短时间内回到水体中被再次利用。将灰水虚拟水与蓝水虚拟水、绿水虚拟水直接相加不够严谨。据此,Zhi 等<sup>[74]</sup>提出了将灰色虚拟水独立分析,以评价区域排污量与水资源纳污能力是否协调的研究思路,既简便可行,又具有理论和实践意义。未来如何建立适当的评价模型,对水量、水质的消耗进行科学、准确地联合评价,以实现水资源质和量的全面可持续利用,也是虚拟水研究中面临的核心问题之一。

3.4 虚拟水战略实践与优化方案改进

虚拟水战略为平衡水资源的分配、缓解缺水地区的水资源问题提供了可能性。但虚拟水战略的研究内容和实践还有待改进。长期以来存在着水资源是公共资源而不是商品的观念,虽然随着水资源稀缺程度的增加,人们逐渐改变了这一观念,但虚拟水的市场经济特征还不完全。研究表明,制度、技术等社会因素比区域水资源的禀赋更重要,因此虚拟水战略的适用性不但与水资源的自然禀赋有关,还与区域的社会经济、政策导向、投资等因素密切相关。目前只有少数国家切实执行了虚拟水战略,而其他地区的虚拟水战略研究多数只是提出了定性的建议,较少有制定定量虚拟水战略并将其付诸实践的。例如,Fracasso<sup>[63]</sup>研究指出哈萨克斯坦等国大量种植棉花并出口,有悖于虚拟水战略的思想,但棉花

出口作为这些国家重要的创汇途径,又是难以改变的现实。中国每年“北粮南运”的粮食约 1 400 万 t,相当于把约 140 亿 m<sup>3</sup> 的水从北方运到了南方,与“南水北调”的方向相反<sup>[63]</sup>,这种农业生产格局也有悖于虚拟水战略的思想,是否需要改变还需要商榷。

目前有少数研究基于虚拟水战略的思想对生产和贸易提出了定量优化方案。例如,Zhang 等<sup>[25]</sup>根据 2007 年中国各省区水稻、玉米、小麦 3 种主要粮食作物的虚拟水分布情况,通过多目标优化决策对全国农业生产格局提出了优化建议。这类虚拟水战略的理论和实践创新,是未来的重要研究方向之一。

4 结 语

虚拟水研究是水资源领域不断发展并日益受到关注的重要方向,虚拟水研究为保障区域、国家和全球水资源安全提供了新思路和新方法。虚拟水研究给予水资源管理者的重要启示为:需要充分认识水资源不同的存在形式,根据水资源直接和间接的利用模式,系统思维、科学配置,更有效地分配、调度和利用各类水资源。虚拟水贸易与调度可以成为实体水调度之外,另一种有效克服局部水资源短缺的办法。虚拟水贸易不仅增加了水资源配置的种类和数量,还拓展了水资源配置的途径和空间,优化了水资源利用效率。未来虚拟水研究还有很多发展方向,包括需要进一步深入探索和完善虚拟水核算模型精度、探寻价格杠杆对虚拟水的影响、发展虚拟水水量与水质联合评价体系、改进虚拟水战略方案等。

参考文献:

[ 1 ] 刘昌明,陈志恺. 中国水资源现状评价和供需发展趋势分析[ M ]. 北京:中国水利水电出版社,2001.

[ 2 ] World Water Assessment Programme. Water for a Sustainable World [ R ]. Paris: UNESCO,2015.

[ 3 ] YANG Hong. Water, environment and food security: a case study of the Haihe River Basin in China [ C ] //BREBBIA C A. River Basin Management II. UK: WIT Press,2003: 120-131.

[ 4 ] ZHANG Zhuoying, SHI Minjun, YANG Hong. Understanding Beijing's water challenge: a decomposition analysis of changes in Beijing's water footprint between 1997 and 2007 [ J ]. Environmental Science & Technology,2012,46(22): 12373-12380.

[ 5 ] ALLAN J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible [ C ] //HOEKSTRA A Y. Priorities for Water Resources Allocation and Management. London: Official Development Assistance,1993: 13-26.

[ 6 ] WILLIAMS E D, AYRES R U, HELLER M. The 1.7

- kilogram microchip: energy and material use in the production of semiconductor devices [J]. Environmental Science & Technology,2002,36(24): 5504-5510.
- [ 7 ] CHAPAGAIN A K,HOEKSTRA A Y. Virtual water flows between nations in relation to trade in livestock and livestock products. Value of water research report series No.13 [R]. Delft: UNESCO-IHE,2003.
- [ 8 ] ZHAO Xu, CHEN Bin, YANG Zhifeng. National water footprint in an IO framework;a case study of China 2002 [J]. Ecological Modeling,2009,220: 245-253.
- [ 9 ] DALIN C, QIU H, HANASAKI N, et al. Balancing water resource conservation and food security in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,2015, 112(15): 4588-4593.
- [10] 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. ( CHEN Guodong. Virtual water: a strategic instrument to achieve water security [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences,2003,18(4): 260-265. (in Chinese))
- [11] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. Value of water research report series No.11 [R]. Delft: UNESCO-IHE. 2002.
- [12] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern [J]. Water Resources Management, 2007,21(1): 35-48.
- [13] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, et al. The water footprint assessment manual: setting the global standard [M]. London: Earthscan,2011.
- [14] 夏骋翔,李克娟. 虚拟水研究综述与展望[J]. 水利经济,2012,30(2): 11-16. ( XIA Chengxiang, LI Kejuan. Overview and prospect for literatures of virtual water research[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2012,30(2): 11-16. (in Chinese))
- [15] ALLAN J A. Overall perspectives on countries and regions [M]. Massachusetts: Harvard University Press,1994.
- [16] OKI T, SATO M, KAWAMURA A, et al. Virtual water trade to Japan and in the world [C]//HOEKSTRA A Y. Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Value of water research report series No. 12. Netherlands: UNESCO-IHE,2003.
- [17] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Globalisation of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade [J]. Global Environmental Change,2005,15: 45-56.
- [18] YANG H, ZEHNDER A. “Virtual water”: an unfolding concept in integrated water resources management [J]. Water Resources Research,2007,43(12): W12301.
- [19] LENZEN M. Understanding virtual water flows: a multi-region IO case study of victoria [J]. Water Resources Research,2009,45(9): W09416.
- [20] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. The blue water footprint of electricity from hydropower [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2012,16: 179-187.
- [21] GB/T 50095—1998 水文基本术语和符号标准[S].
- [22] 水利电力部水利水电规划设计院. 中国水资源利用 [M]. 北京:水利电力出版社,1989.
- [23] 陈华鑫,许新宜,汪党献,等. 中国 2001—2010 年水资源量变化及其影响分析[J]. 南水北调与水利科技, 2013,11 ( 6 ): 1-4. ( CHEN Huaxin, XU Xinyi, WANG Dangxian, et al. Variation of water resources quantity and its impacts in China from 2001 to 2010 [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013,11(6): 1-4. (in Chinese))
- [24] MORILLO J G, DÍAZ J A R, CAMACHO E, et al. Linking water footprint accounting with irrigation management in high value crops [J]. Journal of Cleaner Production, 2015,87: 594-602.
- [25] ZHANG Lijia, YIN Xin ’ an, ZHI Yuan, et al. Determination of virtual water content of rice and spatial characteristics analysis in China [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2014,18: 2103-2111.
- [26] ZHAO Qianbin, LIU Junguo, KHABAROV N, et al. Impacts of climate change on virtual water content of crops in China [J]. Ecological Informatics,2014,19(1): 26-34.
- [27] HUANG Jing, RIDOUTT B G, ZHANG Hailin, et al. Water footprint of cereals and vegetables for the Beijing market [J]. Journal of Industrial Ecology,2014,18(1): 40-48.
- [28] ZIMMER D, RENAULT D. Virtual water in food production and global trade: Review of methodological issues and preliminary results [C]//HOEKSTRA A Y. Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Value of water research report series No. 12. Delft: UNESCO-IHE,2003.
- [29] 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. ( WANG Hongrui, WANG Junhong. Virtual water content of livestock products in China [J]. Environmental Science,2006,27(4): 609-615. (in Chinese))
- [30] LIU Junguo, WILLIAMS J R, ZEHNDER A J B, et al. GEPIC-modelling wheat yield and crop water productivity with high resolution on a global scale [J]. Agricultural Systems,2007,94: 478-493.
- [31] LIU Junguo, ZEHNDER A J B, YANG H. Historical trends in China’s virtual water trade [J]. Water International, 2007,32(1): 78-90.
- [32] WIEDMANN T, MINX J, BARRETT J, et al. Allocating ecological footprints to final consumption categories with input-output analysis [J]. Ecological Economics,2006, 56: 28-48.
- [33] CAZCARRO I, HOEKSTRA A Y, CHOLIZ J S. The water footprint of tourism in Spain [J]. Tourism Management,



- 2014,40: 90-101.
- [34] LI J S, CHEN G Q. Water footprint assessment for service sector: a case study of gaming industry in water scarce Macao [J]. *Ecological Indicators*, 2014, 47: 164-170.
- [35] LAVE L B, COBAS-FLORES E, HENDRICKSON C T, et al. Using input-output analysis to estimate economy wide discharges [J]. *Environmental Science & Technology*, 1995, 29(9): 420A-426A.
- [36] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y. Water footprints of nations. Value of water research report series No. 16 [R]. Delft: UNESCO-IHE, 2004.
- [37] LEONTIEF W. The structure of American economy: 1919-1929 [M]. New York: Oxford University Press, 1941.
- [38] CHEN Xikang. Shanxi water resource input-occupancy-output table and its application in Shanxi Province of China [C]//International Input-Output Association. Paper for the 13th International Conference on Input-output Techniques. Macerata: University of Macerata, 2000.
- [39] 陈锡康, 刘秀丽, 张红霞, 等. 中国9大流域水利投入占用产出表的编制及在流域经济研究中的应用[J]. *水利经济*, 2005, 23(2): 3-6. (CHEN Xikang, LIU Xiuli, ZHANG Hongxia, et al. Compilation of water resources input-occupancy-output tables of 9 major river basins in China and their application in researches on basin economy [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2005, 23(2): 3-6. (in Chinese))
- [40] ZHAO Xu, YANG Zhifeng, CHEN Bin, et al. Applying the input-output method to account for water footprint and virtual water trade in the Haihe River Basin in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(23): 9150-9156.
- [41] 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. (ZHAO Xu, YANG Zhifeng, CHEN Bin. Study on Chinese virtual water trade and consumption in an input-output framework [J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(2): 286-294. (in Chinese))
- [42] ZHANG Zhuoying, SHI Minjun, YANG Hong, et al. An IO analysis of the trend in virtual water trade and the impact on water resources and uses in China [J]. *Economic Systems Research*, 2011, 23(4): 431-446.
- [43] MUBAKO S, LAHIRI S, LANT C. Input-output analysis of virtual water transfers: case study of California and Illinois [J]. *Ecological Economics*, 2013, 93: 230-238.
- [44] LENZEN M. Errors in conventional and input-output-based life-cycle inventories [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2000, 4(4): 127-148.
- [45] LENZEN M. A guide for compiling inventories in hybrid life-cycle assessments: some Australian results [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2002, 10: 545-572.
- [46] LENZEN M, MORAN D, BHADURI A, et al. International trade of scarce water [J]. *Ecological Economics*, 2013, 94: 78-85.
- [47] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. National water footprint accounts: the green, blue and grey water footprint of production and consumption. Value of Water Research Report Series No. 50 [R]. Delft: UNESCO-IHE, 2011.
- [48] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. A global assessment of the water footprint of farm animal products [J]. *Ecosystems*, 2012, 15(3): 401-415.
- [49] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(7): 1259-1276.
- [50] CHAPAGAIN A M, HOEKSTRA A Y. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives [J]. *Ecological Economics*, 2011, 70(4): 749-758.
- [51] CHICO D, ALDAYA M M, GARRIDO A. A water footprint assessment of a pair of jeans: The influence of agricultural policies on the sustainability of consumer products [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 57: 238-248.
- [52] GERBENS-LEENES W, HOEKSTRA A Y, VAN DER MEER T H. The water footprint of bioenergy [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(25): 10219-10223.
- [53] MANZARDO A, REN J, PIANTELLA A, et al. Integration of water footprint accounting and costs for optimal chemical pulp supply mix in paper industry [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 72: 167-173.
- [54] ZHI Yuan, YIN Xin'an, YANG Zhifeng. Decomposition analysis of water footprint changes in a water-limited river basin: a case study of the Haihe River Basin, China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 10: 1549-1559.
- [55] 张林祥. 推进流域管理与行政区域管理相结合的水资源管理体制建设[J]. *中国水利*, 2003(5): 30-31. (ZHANG Linxiang. Combination policy of local administrative management and river basin management of water resources [J]. *China Water Resources*, 2003(5): 30-31. (in Chinese))
- [56] SCHENDEL E K, MACDONALD J R, SCHREIER H, et al. Virtual water: a framework for comparative regional resource assessment [J]. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*, 2007, 9(3): 341-355.
- [57] WU Feng, ZHAN Jinyan, ZHANG Qian, et al. Evaluating impacts of industrial transformation on water consumption in the Heihe River Basin of Northwest China [J]. *Sustainability*, 2014, 6(11): 8283-8296.
- [58] HOEKSTRA A Y. The water footprint of modern consumer society [M]. London: Routledge, 2013.
- [59] GOSWAMI P, NISHAD S N. Virtual water trade and time scales for loss of water sustainability: a comparative

- regional analysis [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 9306.
- [60] YANG Zhifeng, MAO Xufeng, ZHAO Xu, et al. Ecological network analysis on global virtual water trade [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46 (3): 1796-1803.
- [61] MAO Xufeng, YANG Zhifeng. Ecological network analysis for virtual water trade system: a case study for the Baiyangdian Basin in Northern China [J]. Ecological Informatics, 2012, 10: 17-24.
- [62] MAO Xufeng, YUAN Donghai, Wei Xiaoyan, et al. Network analysis for a better water use configuration in the Baiyangdian Basin, China [J]. Sustainability, 2015, 7 (2): 1730-1741.
- [63] FRACASSO A. A gravity model of virtual water trade [J]. Ecological Economics, 2014, 108: 215-228.
- [64] ZHAO Xu, LIU Junguo, LIU Qingying, et al. Physical and virtual water transfers for regional water stress alleviation in China [J]. Proceedings of the National Academy of the Sciences of the United States of America, 2015, 112(4): 1031-1035.
- [65] 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. (MA Jing, WANG Dangxian, LAI Hailiang, et al. Water footprint-an application in water resources research [J]. Resources Science, 2005, 27(5): 96-100. (in Chinese))
- [66] SEEKELL D A, D'ODORICO P, PACE M L. Virtual water transfers unlikely to redress inequality in global water use [J]. Environmental Research Letters, 2011, 6(2): 024017.
- [67] WEISS E B, SLOBODIAN L. Virtual water, water scarcity, and international trade law [J]. Journal of International Economic Law, 2014, 17(4): 717-737.
- [68] RIDOUTT B G, PFISTER S. A revised approach to water footprinting to make transparent the impacts of consumption and production on global freshwater scarcity [J]. Global Environmental Change, 2010, 20: 113-120.
- [69] FENG Kuishuang, HUBACEK K, PFISTER S, et al. Virtual scarce water in China [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(14): 7704-7713.
- [70] KONDO K. Economic analysis of water resources in Japan: using factor decomposition analysis based on input-output tables [J]. Environmental Economics and Policy Studies, 2005, 7: 109-129.
- [71] 李晓惠, 张玲玲, 王宗志, 等. 江苏省用水演变驱动因素研究[J]. 水资源研究, 2014, 3(1): 50-56. (LI Xiaohui, ZHANG Lingling, WANG Zongzhi, et al. Study on driving factors of water utilization structure evolution in Jiangsu Province [J]. Journal of Water Resources Research, 2014, 3(1): 50-56. (in Chinese))
- [72] ZHAO Chunfu, CHEN Bin. Driving force analysis of the agricultural water footprint in China based on the LMDI method [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(21): 12723-12731.
- [73] 韩雪, 刘玉玉. 虚拟水研究进展[J]. 水利经济, 2012, 30(2): 17-21. (HAN Xue, LIU Yuyu. Research advances in virtual water [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2012, 30(2): 17-21. (in Chinese))
- [74] ZHI Yuan, YANG Zhifeng, YIN Xin'an, et al. Using grey water footprint to verify economic sectors' consumption of assimilative capacity in a river basin: model and a case study in the Haihe River Basin, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 92: 267-273.

(收稿日期: 2015-06-19 编辑: 刘晓艳)

(上接第 51 页)

- [18] SUNDBORG A. Significance of fluvial processes and sedimentation [C]//Proc Hydrology Symposium: Fluvial Processes and Sedimentation. Ottawa: Canada National Research Council, 1973: 1-10.
- [19] HOLEMAN J N. The sediment yield of major rivers of the world [J]. Water Resources Research, 1968, 4: 737-747.
- [20] GOLDBERG E D. The health of the oceans [M]. Paris: UNESCO, 1976.
- [21] MILLIMAN J D, FARNSWORTH K L. River discharge to the coastal ocean: a global synthesis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011: 23-46.
- [22] MILLIMAN J H, SYVITSKI J P M. Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers [J]. Journal of Geology, 1992, 100: 325-344.
- [23] SCHUMM S A. The disparity between present rates of denudation and orogeny [R]. Washington, D. C.: USGS, 1963: 1-13.
- [24] JANSEN J H L, Painter R. B. Predicting sediment yield from climate and topography [J]. Journal of Hydrology, 1974, 21: 371-380.
- [25] GILLULY J. Geologic contrasts between continents and ocean basins [J]. Geological Society of America Special Papers, 1955, 62: 7-18.
- [26] KUENEN P H. Marine geology [M]. Chichester: John Wiley and Sons, 1950.
- [27] FOURNIER F. Climat et erosion [M]. Paris: Presses Universitaires de France, 1960.
- [28] LIU C, HU C H, HE Y. Total sediment flux entering the sea from major Chinese rivers and rough estimation for global land-ocean sediment flux [C]//FUKUOKA S, NAKAGAWA H, SUMI T, et al. Advances in River Sediment Research. Florida: CRC Press, 2011: 201-202.

(收稿日期: 2015-06-30 编辑: 骆超)