

实体水-虚拟水“二维三元”耦合流动理论基本框架

吴普特^{1,2}, 高学睿^{1,2}, 赵西宁^{1,2}, 王玉宝³, 孙世坤³

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 杨凌 712100;
3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100)

摘要: 在变化环境下, 区域水资源系统演变规律正在发生深刻变化。解决新形势下出现的水问题单单依靠传统的实体水资源规划、调度和调控手段还不够。虚拟水概念和理论的提出拓展了水文水资源的认知范畴, 丰富了水问题的解决手段。然而, 如何搭建虚拟水理论与传统水文水资源认知体系的统一框架, 认识自然-经济-社会连续系统中水资源演化的新规律, 目前学界还没有成熟统一的看法。该文首先提出了实体水-虚拟水耦合流动效应的基本理论框架, 指出实体水-虚拟水耦合流动是现代环境下自然-经济-社会水资源系统呈现的新特征。其次, 从文明进步和生产力发展角度, 论述了人类社会水文水资源系统的演化历史, 将水文水资源系统演进大体分为三个阶段: 早期的实体水“一维一元”自然循环阶段, 近现代的实体水“二元”水循环阶段和当前的实体水-虚拟水“二维三元”耦合流动阶段。最后, 该文详细论述了实体水-虚拟水耦合流动过程的路径结构, 并针对其流动过程和状态表征提出了定量表达方程, 初步构建了实体水-虚拟水耦合流动基本理论框架。

关键词: 水资源; 耦合; 模型; 实体水; 虚拟水; 二维三元

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.001

中图分类号: S273; TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-12-0001-10

吴普特, 高学睿, 赵西宁, 王玉宝, 孙世坤. 实体水-虚拟水“二维三元”耦合流动理论基本框架[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 1-10. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.001 http://www.tcsae.org

Wu Pute, Gao Xuerui, Zhao Xining, Wang Yubao, Sun Shikun. Framework of “two-dimension three-element” coupling flow of real water and virtual water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(12): 1-10. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.001 http://www.tcsae.org

0 引言

水资源危机是 21 世纪全球性战略性危机。目前, 全球有 43 个国家约 7 亿人口遭受水资源短缺问题的困扰^[1], 水多、水少、水脏、水浑等水资源问题严重影响人类的生活质量和经济社会的可持续发展水平^[2]。从水资源的特性来看, 它既是具有天然属性的自然资源, 又是具有经济社会属性的效用资源。因此, 水资源的有效可持续利用与管理不仅要重视水作为自然物质本身的运动规律, 也应考虑水资源在经济生产和社会消费过程中的价值流动特性。传统水文水资源学科以水循环过程认知和水资源高效利用为目的, 建立了以实体水的“运动-演变-利用-影响”为路径的理论架构。在上述理论支撑下, 人们运用调蓄工程、跨流域调水工程、海水淡化工程、节水型社会建设、水权制度建设、最严格水资源管理等多种措施实现水资源的开源取用和节流增效, 追求水资源利用效率的提升和水资源系统的可持续发展^[3]。事实证明, 实体水资源的增加供应、优化分配和节约使用等措施并不能完全解决区域的水资源问题^[4], 尤其在高度市场化和经济全球

化的大背景下, 社会产品的自由竞争和区域发展的不平衡性进一步加剧了贫水地区的水资源供需矛盾, 这种矛盾通过实体水资源的调度和调控似乎难以解决。中东地区是全球淡水资源最为匮乏的地区之一。20 世纪 80 年代之前这里经常“为水而战”, 以色列和巴勒斯坦的“巴以战争”以及以色列和黎巴嫩的“黎以战争”在很大程度上都是一场争夺水资源的战争。20 世纪 90 年代以后, 中东各国纷纷在国际市场上通过进口水密集型粮食满足本国的粮食需求, 从而在很大程度上缓解了本国的用水矛盾, 也促进了地区安全^[5]。中国人口众多, 南方水多, 北方水少, 水资源供需矛盾十分严峻。为改变南北方水资源时空分布不均的现状, 中国从 2002 年开始启动了“南水北调”战略性调水工程建设, 如今“南水北调”中线工程和东线工程均已建成, 每年的设计调水量可达到 180 亿 m³ 以上^[6]。然而, 从 1990 年以来, 中国“北粮南运”格局逐渐形成, 每年从北方输送到南方粮食中嵌入的水资源量从 90 亿 m³ 增长到 500 亿 m³ 以上^[7]。由此看来, 由南方调入北方的水资源似乎又通过粮食贸易返还给南方地区, 从而产生了实体水“南水北调”和农业虚拟水“北水南调”的矛盾和挑战。

由此可见, 在全球市场化推进和经济社会的深入发展过程中新涌现的水资源现象和规律迫切需要拓展已有水资源理论, 扩展传统水资源演化过程的认知范畴, 从“自然-经济-社会”整个完整链条中认识水资源的运动规律。为了刻画水资源在自然-经济-社会系统中转化运动的

收稿日期: 2016-03-01 修订日期: 2016-04-29

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51409275); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2016JQ5076); 国家科技支撑计划(2011BAD29B09)。

作者简介: 吴普特, 男, 陕西武功人, 博士生导师, 主要从事节水农业和虚拟水流动与贸易研究。杨凌 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100。

Email: gjzwpt@vip.sina.com

客观规律,水文与水资源相关研究一直在寻求新的视角和构建新的理论框架来解析和表征其内在机理。20 世纪 80 年代,英国学者 Allan 首次提出通过进口粮食或其他农产品等水密集型产品来减少对本国或本区域天然水资源的消耗,从而缓解贫水地区的水资源压力,这种思路已提出了虚拟水贸易的雏形,不过当时称之为嵌入水(embedded water)^[8],意为隐含在商品或者服务中的水分。20 世纪 90 年代,在进一步深化研究的基础上,Allan 提出了虚拟水(virtual water)的概念^[9],用以衡量经济社会系统生产商品以及提供服务过程中所消耗的水资源数量。虚拟水理论的提出为水资源管理和供需安全战略提供了新的思路。21 世纪初,荷兰学者 Hoekstra 提出了水足迹的概念^[10],进一步完善和发展了虚拟水理论,将经济社会耗用的水资源凝结在具体的商品或者服务的产业链中,可以真实地反映经济社会活动单元(人、地区、国家或者商品)对水资源的需求和占用情况。经过深入拓展,水足迹理论将产品或者服务对水资源的消耗基本上分为绿水足迹、蓝水足迹和灰水足迹^[11]。目前,绿水足迹和蓝水足迹的概念在国际上已有广泛应用,但是灰水足迹的计算方法还不完善,还需要进一步发展。上述不同水足迹分量可以表征对不同类水资源形式的占用以及对水环境的影响^[12]。虚拟水和水足迹是一脉相承的理论,它们的提出与发展揭示了水资源作用于经济社会的效用本质,是一种新的水资源观^[13]。

从水循环过程和水资源演变角度来看,人类社会早期阶段地球上的水主要在重力和太阳能的驱动下呈现天然水文特征^[14];人类文明发展到今天,经济社会活动改变了天然水的流动路径,提高了水文循环速率,影响了水循环及其伴生过程的原始特征,水资源很大一部分进入经济社会系统,创造了价值,产生了效益,丰富了经济产品和社会消费^[15]。由此可见,现代环境下水资源的演变运移过程本质上是水作为物质实体在水圈连续性的运动(实体水)与水作为效用资源在经济社会系统中价值实现过程(虚拟水)两者交织在一起,形成复杂的互耦互馈关系^[16]。在上述思考的基础上,本文提出实体水-虚拟水耦合流动理论的基本认知模式,从实体水-虚拟水耦合现象的基本概念和主要特点、实体水-虚拟水耦合流动规律的演化进程、实体水-虚拟水耦合作用的关系框架以及实体水-虚拟水耦合流动过程的表征方法等方面展开探讨,建立实体水-虚拟水耦合流动规律的理论框架,为全球尺度水资源协同高效利用,以及服务中国最严格水资源管理实践提供理论支撑和决策依据。

1 实体水-虚拟水耦合作用的基本认知

在现代环境下,水资源具有显著的天然循环再生和经济效用价值双重属性。无论从全球尺度还是从区域尺度来看,水资源的演化已经从人类历史早期的单一自然水循环路径为主逐渐分化为自然系统、经济生产系统和社会消费系统“三元化”路径模式,进入经济社会系统的水资源通量急剧增大。从 1900 年到 2000 年,全球的

用水量从 4 000 亿 m^3 增长到 57 000 亿 m^3 ,这些水量基本全部进入了经济社会系统,占到了全球水资源总量的 12%以上^[17],由此可见,伴随着复杂水资源系统的逐步演变,水资源系统的结构特征发生了根本性变化。

1.1 实体水-虚拟水耦合流动的概念

从本质上来说,水资源复杂演化模式是由水资源的自然、经济和社会属性决定的。一方面,水作为自然物质,服从牛顿流体的运动规律,在自然系统和经济社会系统中受到太阳能、地球重力势能、人工调配等作用,形成了以“天然降水-广义水资源-自然蒸散-经济社会利用-退水”路径为特征的实体水流动过程。另一方面,水作为生产资料,服从经济生产过程中资源的配置规律,在经济生产系统中受到原材料生产、商品生产和生产效益等因素的影响,形成了“实体水摄取-实体水耗散-虚拟水的嵌入”为主要环节的实体水和虚拟水之间交互转化过程。第三方面,水作为社会消费的重要资源,嵌入商品的虚拟水服从商品流通规律,形成了以“商品流通(虚拟水贸易)-商品消费(虚拟水消费)-回收再生产(虚拟水回用)”为特征的虚拟水流动过程。在现实生产生活中,水资源实体形式的流动过程与虚拟形式的流通过程紧密耦合,彼此交织,相互影响,互为反馈。实体水可供给量的变化直接影响商品的生产过程和产量,也影响居民的消费方式和福利水平。基于以上分析,实体水-虚拟水耦合流动规律的本质一方面是在自然-经济-社会系统中的传输、配置、调度过程,是水资源的物理流,其运动参数可以由降水、水资源量、取水量、自然蒸散量、经济社会用水耗散量、用水单元排水量以及通过渠系管网向自然水体的退水量等表征;第二方面是水资源作为生产资料在经济系统中从实体水向虚拟水的转化过程,是水资源的效用流,其运动参数可以由商品总量、消费需求引力、商品水分生产效率(生产水足迹)等来表征;第三方面是水资源作为效用资源在社会系统中的价值实现过程,即隐含在商品中的水资源以“流通-贸易-消费-回收再生产”为路径的虚拟水流动过程,是水资源的价值流,其运动参数可以由商品贸易量(虚拟水贸易)、产品消费折旧(虚拟水耗散)、残值回收(虚拟水回归)等来表征。

1.2 实体水-虚拟水耦合流动规律的基本特征

实体水-虚拟水耦合流动是水资源的物理形态运动和效应价值转化过程的耦合。水资源物理形态运动是传统水文水资源学科的研究重点,通过水资源评价、水资源规划以及水资源调度等手段实现实体水向自然-经济-社会系统的有序流动。现代经济社会系统的充分发展是实现水资源效用价值转化的重要前提。水资源效用价值的转化过程可以分为两大阶段,一是实体水通过社会生产手段转化为商品或者产品的价值,即虚拟水的嵌入过程;二是通过社会消费手段,商品的价值量以折旧的方式逐渐减少,隐含在商品中的虚拟水也随之耗散的过程。需要指出,有些商品在消费周期的末端可以将残值进行回收从而实现了虚拟水的回收再利用。由此可见,现代环

境下高强度物质生产和商品消费促使水资源效用价值快速流通和相互转化, 经济社会系统的虚拟水通量急剧增大。在此背景下, 区域实体水-虚拟水耦合流动的规律特征日益显现。概括来讲, 区域实体水-虚拟水耦合流动过程具有如下几大特征:

实体水-虚拟水耦合流动受水资源在“物理场-经济社会场”的双重驱动。具体来说, 实体水的运动过程受到太阳能、地球重力、人工能等基本物理力的作用。水文学 400 多年的充分发展和进步, 开创了产汇流、水流连续运动以及非饱和带传输等方法理论, 为实体水的流动和调控提供了坚实的支撑手段; 虚拟水的运动本质上是水资源价值的流动过程, 驱动力主要来自经济的生产需求和社会的消费拉力。虚拟水流动过程的解构需要水资源经济相关理论和方法支撑。然而水资源作为一门应用学科被正式提出至今仅有 30 多年的时间, 水资源价值理论、优化配置理论、可持续利用理论等均有较大进展, 但还未形成十分完备的理论体系, 水资源在经济社会系统中的价值流动过程的表征方法还未完全建立。总的来看, 实体水-虚拟水耦合流动受到双重驱动力即自然力和人工力的支配, 决定了水资源的演变路径、过程参数和利用结构。

实体水-虚拟水流动呈现出在“自然-经济-社会”系统中的三元路径。上文提及, 实体水-虚拟水耦合流动的本质是水资源的物理流、效用流与价值流的耦合运动。其流动路径在时空上分属 3 个环节, 第一是水资源在河渠管网中的物理流路径, 是实体水的传输过程; 第二是水资源投入到经济生产并嵌入到商品和服务当中形成虚拟水, 是实体水向虚拟水的转化环节; 第三是社会产品的贸易和消费过程, 其本质是虚拟水的贸易流和消费流。河渠管网中的物理流以降水-产汇流-人工引调水-蒸散发为主要路径形成陆地实体水循环回路; 水资源在经济生产中流动以取水-用水-耗水-虚拟水嵌入为主要形式, 构成了水资源的价值实现过程; 虚拟水的贸易和消费流以社会产品贸易和消费为主要载体, 形成以产品贸易-产品消费-产品残值回收为主要路径的虚拟水利用耗散过程。由此可见, 上述 3 个环节各自均呈闭环回路, 同时又相互交织耦合, 形成了水资源在自然-经济-社会中的复杂流动格局。

实体水-虚拟水耦合流动过程具有显著的互馈与协同演化特性。实体水和虚拟水的耦合流动过程集中表现为实体水的运动过程与虚拟水的流动特征具有互馈作用, 并具有协同演化特征。实体水资源的可利用水平以及时空特性显著影响区域经济社会规模和生产结构, 进而影响区域的虚拟水供需态势。如中国水资源相对丰富的南方地区高耗水产业结构比重较大, 水稻种植、直流水冷发电等产业均为耗水大户。相比之下, 水资源缺乏的北方地区以旱作节水农业、空冷发电等技术为主。同样, 虚拟水的流动和消费格局会对实体水资源的需求和流动格局产生反馈作用。近些年中国北方经济规模的持续增长, 对实体水资源的需求量急剧增大, 北方粮食生产不

仅满足本地区的消费需求, 同时也向南方地区运输, 形成了可观的粮食生产虚拟水贸易的流动规模, 由此导致中国北方地区的水资源压力骤增。近些年, 中国北方地区跨流域跨区域调水工程层出不穷, 南水北调中东线的年调水规模将达到 280 亿 m^3 , 接近半条黄河的水量。由此可见, 虚拟水的消费和流动从一定程度上改变了中国实体水资源的时空布局。总的来看, 实体水-虚拟水的互馈影响作用加速了水资源在自然-经济-社会系统的协同演化过程, 实体水对经济社会虚拟水消费过程产生驱动作用, 虚拟水对实体水资源系统的时空格局具有反馈作用, 这种协同互馈机制是实体水-虚拟水耦合流动的根本特征。

2 实体水-虚拟水耦合流动规律的演化进程

由于人类活动不断增强, 经济社会的活动空间空前扩展, 实体水-虚拟水耦合作用效应日益显现, 其作用域也在逐渐扩展。从文明的发展史来看, 人类对水资源系统的干预是一个逐步介入的过程, 对水文水资源过程机理认知也是一个逐渐深入的过程。秦大庸等^[18]从人类社会生产力对水资源系统的干预和影响能力角度出发, 将中国的社会发展历史分为四大阶段: 采食经济阶段、农耕经济阶段、大规模农田灌溉和工业化起步阶段、大规模工业化和城市化阶段。在采食经济阶段, 人类逐水而作, 傍水而居, 原始的采集、狩猎和捕鱼是最常见的生产方式, 人类还不具备对物质的创造力和改造自然的主动性。在该阶段, 由于人类尚不具备对水资源系统的干预能力, 流域水文和水资源系统主要受自然力作用在自然水文学原理支配下进行着天然的演化和变迁。到农耕经济阶段, 随着生产力的进步和人口规模的增长, 以传统采食为特征的生产关系难以满足人类社会的物质需求, 由此出现了原始的农业、畜牧业和养殖业。大规模的农业生产促使人类开始认识自然和改造自然, 由于农业灌溉水利的需要, 促使人们对自然水文水资源系统的运动规律进行观察和总结, 逐渐形成了水文水资源的相关理论, 客观上增强了人类改造天然水文水资源系统的能力。在大规模农田灌溉和工业化起步阶段, 由于社会人口激增, 市场经济迅速兴起, 中国开展了长时间大规模的水利建设。据统计, 从建国初期到改革开放之前, 全国大中型水库从 2 000 多座激增为 8 万余座, 灌溉面积从 0.16 亿 hm^2 增长到 0.47 亿 hm^2 以上^[19]。由于农业用水的快速增长, 许多地区除地表水以外, 大量抽取浅层地下水 and 深层地下水, 水循环失调和伴生水生态环境问题逐步显现^[20]。20 世纪 70 年代以来, 中国华北平原的地下水漏斗逐年增多, 如今华北平原地下水漏斗的最大面积达到 8 000 km^2 , 区域地下水资源的超量利用问题十分严重^[21]。上述事实表明人类活动对水循环系统的影响更为显著。1978 年改革开放以来, 中国步入了大规模工业化和城市化发展阶段。在该阶段中国经济快速发展, 工业实现跨越式腾飞, 工业用水量从 1980 年的 508 亿 m^3 增长到 2014 年的 1 406 亿 m^3 ^[22], 工业用水成为经济社会总

用水的主要增长点之一。同时,随着城市化进程的推进,城市生活用水亦有大幅度的增长。农业、工业和城市生活和第三产业的发展对水文水资源系统均产生了较大的影响^[23],带来了水资源供需矛盾突出、水生态环境恶化、用水竞争和挤占等众多问题。在这样的背景下,解决区域水资源问题,除了依靠流域内水利工程调控和传统的节水增效水资源管理方法以外,还出现了云水资源利用^[24]、泛流域管理^[25-26]、虚拟水战略与贸易^[27]等新理论和新视角。由此表明,人类对水文水资源系统的认知进一步深化。

从社会文明演进角度考量人们对水文水资源系统的认知历程和发展阶段,可以将水文水资源系统的演化过程分为 3 个时期:第一时期可以归属到社会文明的采食阶段、农耕经济阶段和大规模农田灌溉和工业化起步的早期阶段,由于人类活动对自然的影响极其微小,生产关系和社会贸易的发展都不成熟,区域的水分运动主要受到天然力驱动,水文水循环过程主要呈现为纯自然实体水的“一元”流动。从水文学诞生开始,学界一直视“一元”的自然水循环为研究对象,建立了以“降水-蒸散-径流”为主要研究过程的水文学原理。第二时期可以归属到大规模农田灌溉和工业化起步的晚期阶段和大规模工业化和城市化发展的早期阶段。由于气候变化和人类活动的不断增强,水文水资源的演变过程和循环结构都日益复杂化,水分运动的驱动力不仅受到天然力的影响,人工动力也成为水分循环的重要驱动力,尤其在某些人类活动的密集区,人工动力对水文水资源系统的影响甚至超过了天然力。王浩^[28]等深入研究了水文水资源系统这种新的演变特点,提出了二元水循环演化模式,拓展了传统“一元”实体水循环的认知深度。第三时期可以归属到大规模工业化和城市化发展的兴盛阶段,亦即当前正经历的社会经济阶段。进入 21 世纪以来,水资源的供需矛盾更加突出,局部的水资源危机逐步演变为全局性、全球性危机。水资源已经成为一种战略性的资源,许多国家通过进口水资源密集型商品缓解本国的水资源压力,提出了虚拟水理论和虚拟水战略^[29]。虚拟水概念的提出是对水文水资源系统认知的又一次深化。传统的“一元”水文学理论和“二元”水循环模式理论均以实体水资源为对象,研究实体水在复杂下垫面条件和人类活动干扰条件下的运移转化规律,进而为实体水资源的规划、调度、管理和高效利用提供理论支撑。虚拟水理论的出现拓展了对水文水资源系统的认识理念,在实体水资源的认知维度上增加了以水资源的效用价值流动为研究对象的虚拟水资源认知维度。同时也丰富了水文水资源演变过程的研究内容,除传统的以“降水-蒸散-径流”为路径的天然水文过程和以“取水-用水-耗水-排水”为路径的二元水循环过程研究以外,增加了隐含在商品服务中的虚拟水资源在经济社会中的贸易、流动、消费和耗散过程的研究内容。可以预见,在经济全球化和高度商品化的背景下,实体水资源和虚拟水资源耦合的“二维三元”流动规律将成为现代环境下水文水资源系统的最本质特征之一。从社会文明的发展角度总结人类对水

文水资源系统的认知深度和演化进程,可由图 1 表示。

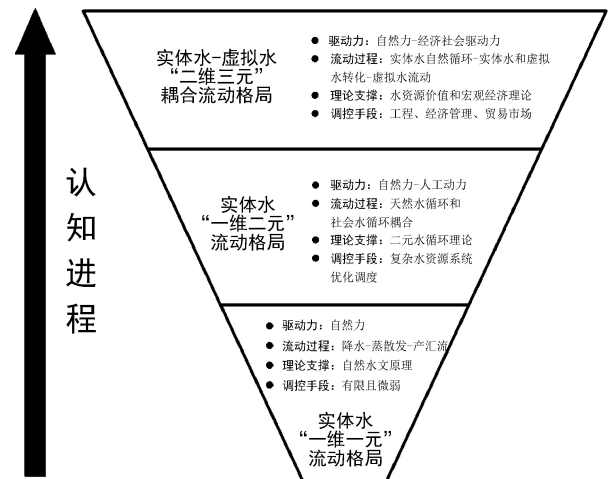


图 1 人类对水文水资源系统认知的深化历程

Fig.1 Understanding process on hydrology and water resources system

3 实体水-虚拟水耦合作用机制与过程表征框架

实体水流动从人类早期的纯自然“一元”流动逐步演变为自然和人工共同影响下的“二元”流动新格局。随着人口快速增长和城市化水平的推进,实体水资源很大一部分进入经济社会系统,参与商品生产和社会消费,发挥水的资源效用,形成了水资源的价值流即虚拟水流动现象,从而产生了实体水-虚拟水耦合流动的“三元”格局。由此可见,实体水-虚拟水耦合作用的本质源于水的资源效用功能,耦合作用发生条件则是基于经济社会市场的高度繁荣和发展,区域间贸易机制的逐步建立与成熟,耦合作用传递介质则是“自然-经济-社会”复杂的水资源调配体系以及经济社会各产业的生产链和消费链。

3.1 实体水-虚拟水耦合作用机制

实体水-虚拟水耦合流动规律是现代环境下水资源的实体物流、效用流和价值流在自然-经济-社会系统中运动的基本特征。近些年,水资源供需矛盾突出,区域水资源开发利用效率急剧增大,本地可利用水资源和区域外引调水资源大量进入经济生产和社会消费系统,具体表现为:一方面有限的实体水资源在经济社会系统中进行调配和利用;另一方面生产的产品伴随着虚拟水贸易和流动在区域内或者跨区域进行消费。上述过程是在实体水物理场和虚拟水经济社会场支配下的复杂巨系统。系统运行中,实体水和虚拟水流动在过程路径、过程参数以及过程通量三大方面具有明显耦合特性,同时也伴随耦合反馈效应(见图 2 所示)。

在过程路径方面,实体水的运移调配路径和虚拟水的生产消费路径彼此交织,相伴相生。这种耦合作用主要体现在产品的生产环节。产品生产环节是水资源效用价值化的过程,也是实体水的价值固化为商品的虚拟水的关键过程。实体水的流动路径客观上影响着经济社会系统的产业结构、生产方式和生产规模,进而影响到虚拟水的产生、累积、流动和消费过程。一般来说,一个

区域实体水投入较多的产业领域，必然带来该产业领域生产规模的扩大和消费活动的增强。相反，一个区域实体水投入较少的产业领域，会导致该产业的生产萎缩和消费缺口增大，需通过虚拟水贸易、货物进口等方式满足消费需求。从本质上说，实体水和虚拟水流动过程路径的耦合交织现象是水资源对国民经济发展不可替代的效用价值决定的。

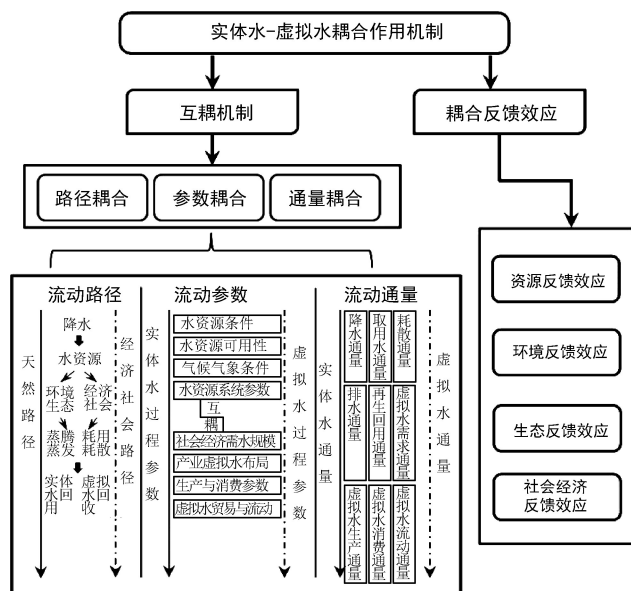


Fig.2 Coupling mechanism between real water and virtual water

在过程参数方面，传统的实体水运动描述主要是刻画天然水资源在“降水-产汇流-介质流-河网流”过程中演化规律以及社会水资源在国民经济消费系统中以“取调水-用水-排水-回用水”为特征的转化规律。上述过程通常可以用降水量、蒸散发量、下垫面参数、河网水流参数、社会需水量、社会供水量、社会排水量、排水水质负荷等参数来表征，这些参数通过水量平衡原理，可以较为详细地描述实体水在“自然-社会”系统中的运动状态和流动分量。相比之下，实体水-虚拟水耦合流动过程的参数描述和结构更为复杂，除实体水运动过程的描述参数外，还包括实体水转化为虚拟水的过程以及虚拟水的消费、流动和贸易过程的描述参数，这些参数包括实体水向虚拟水转化过程中的水分生产率（生产水足迹）、耗水率、单位产品的污水排放负荷（灰水足迹）、经济社会规模（虚拟水需求强度）以及虚拟水贸易量等。上述参数紧密耦合，互为影响，共同描述实体水-虚拟水流动过程规律。

在过程流量方面，实体水流动流量与虚拟水的生产和消费流量紧密联系在一起。流量是水循环和水资源流动过程中的重要表征指标，也是衡量水资源演变特性的关键参数。实体水流量与虚拟水流量的耦合作用是实体水-虚拟水耦合流动的根本特征，表明水资源服务于国民经济的价值和效用属性。实体水的利用流量决定虚拟水的生产流量和贸易流动流量。同时，虚拟水的需求流量也反作用于实体水资源系统，促进区域水资源系统的优

化布局 and 高效调度。

在实体水-虚拟水流动路径、流动参数和流动流量耦合效用的背景下，实体水和虚拟水流动还存在显著的反馈效应，包括资源反馈效应、环境生态反馈效应和社会经济反馈效应。资源反馈效应表现为实体水的开发利用和虚拟水的生产贸易带来的水资源衰减和流域水循环过程的失调，即水资源的次生演变效应。从宏观尺度来看，人类的经济社会活动带来了全球气候变化、区域下垫面演变等后果，进而影响水文循环过程，造成洪涝、干旱等水灾害事件频发。从区域尺度来看，水资源的无序利用造成河道断流、地下水枯竭等问题，影响了水资源的可持续开发利用。环境生态反馈效应是指实体水-虚拟水生产流动过程中伴生的生态环境影响效应，包括水环境污染、水生态退化、水景观和水文化缺失等问题，这些问题都是水资源在无序开发利用过程中客观产生的副作用。社会经济反馈效应实质上表现为实体水与虚拟水的协同互馈演化过程，实体水和虚拟水的时空格局显著影响区域生产力布局、产业结构布局以及管理制度布局，这个过程反过来又会影响到社会经济对实体水和虚拟水的需求和利用特征。

3.2 实体水-虚拟水耦合流动路径解析

结合前文分析，实体水-虚拟水的耦合流动其本质是水资源的实体物流、效用流和价值流的互馈耦合运动过程。水资源的物流随着人类活动影响加剧和经济社会用水总量的增加，以往的自然水循环逐步演变为“自然-人工”二元水循环的流动路径，实体水资源运动路径的复杂演化客观上加大了实体水资源的流动速度，也加剧了流域水资源的演变速率。与此同时，水资源的效用流和价值流伴随着商品生产和社会消费，在经济社会系统中形成了虚拟的流动路径，发挥水资源对国民经济发展的基本服务功能。从实体水-虚拟水耦合流动的过程来看，可以将实体水-虚拟水的运移转化过程分为 3 个独立的阶段：一是实体水资源的流动过程，主要定义为天然降水转化为水资源，并被经济社会用水部门摄取的过程，可称之其为水资源物流；二是水资源作为生产资料进行商品生产的过程，该过程实质上是实体水与虚拟水之间的转化过程，通过商品生产实体水资源被耗用或者嵌入到商品之中，形成的虚拟水则隐含在商品中，该过程可称之其为水资源效用流；三是虚拟水的耗用和贸易流动过程。在该过程当中，人们通过消费社会产品或者进行商品贸易，客观上消耗了商品中的虚拟水或者使得商品中的虚拟水进行了空间上的转移，改变了隐含在商品中虚拟水的数量和时空布局，该过程可称之其为水资源的价值流。

总体上来看，实体水-虚拟水耦合流动过程可概括为“二维三元”的路径结构。“二维”从水资源的实体水流以及价值流动两个维度描述其运动规律，不仅涉及到传统水文学和水资源的相关理论，同时也涉及到水资源经济学和贸易学等相关理论方法。“三元”从水资源的演变环节和社会生产和消费过程描述实体水和虚拟水的流

动路径及其它它们之间的转化关系。实体水-虚拟水“二维三元”的路径结构可由图3表示。

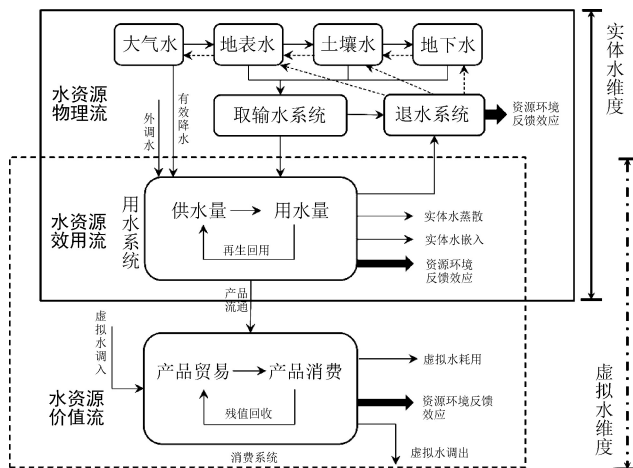


图3 实体水-虚拟水耦合流动的“二维三元”路径结构

Fig.3 Structure and route of coupling flow of real water and virtual water

上图对实体水-虚拟水的耦合流动路径进行了抽象的概括。从流动结构来看，实体水-虚拟水的耦合流动过程呈现两大互耦流动架构，一是实体水遵循水文过程规律和水资源流动理论在“自然-社会”系统中的循环过程，主要运动形式有：降水、蒸散发、地表径流、土壤水、地下径流以及社会水资源系统中的“取-用-耗-排-回用”等形式；二是虚拟水遵循经济社会和商品贸易规律，在经济生产和消费系统中流动过程，主要运动形式包括：商品生产伴随的虚拟水嵌入、商品贸易伴随的虚拟水流动、商品消费的虚拟水耗用、商品残值回收伴随的虚拟水回用以及区域商品贸易伴随的虚拟水输入输出。

从流动路径来看，实体水-虚拟水耦合流动可解析为三段流动的共同作用，分别为水资源物理流、水资源效用流和水资源价值流。水资源物理流主要是指实体水的流动过程，也是传统水文学和水资源研究的主要对象。实体水资源作为经济生产的必备资料，也是社会消费活动的必需品，实体水资源的运动过程和时空演化路径是实体水-虚拟水耦合流动过程研究的基础，其研究和调控手段包括水文过程预报、水资源评价、水资源配置、水资源规划调度等。水资源效用流是指实体水进入经济社会各个产业当中并通过一定的生产活动转化为产品中的虚拟水的流动过程，是实体水和虚拟水之间转化的重要环节，体现的是水资源作为生产资料对经济生产活动的资源效用。一般来说，水资源效用流主要表现在经济社会三大用水户当中，即生产、生活和生态。对于生产部门中的农业来说，实体水资源以有效降水量以及径流性水资源的形式进入农业系统，通过农林生产以及牧渔养殖活动转化为隐含在粮食、木材以及肉奶蛋等农产品的虚拟水，从而完成了实体水向虚拟水的转化，也实现了水资源服务于农业生产的效用价值。对于生产部门中的工业来说，实体水资源通过取用水系统进入工业生产链，经过复杂的生产工艺，实体水被耗散掉或者嵌入工业产

品当中，同时换来了各种各样的工业用品，水资源的效用价值则隐含在这些工业产品当中，实现了水资源服务于工业生产的效用。对于生活来说，实体水资源一般以自来水的形式供给千家万户，满足人们日常生活当中饮用、烹饪、除尘、洗涤等目的，进而实现了实体水服务于生活的效用。对于生态来说，尤其是在人工生态系统，实体水通过河湖沟渠引入生态湿地或者景观湖库当中。景观水面的增大必然带来实体水资源的耗散量加大。在实体水资源耗散的同时，客观上营造了良好的栖息环境，改善了局部生态气候，促进生态系统周边的生物多样性恢复，带来了诸多的生态环境效益，体现了水资源服务于生态系统的效用价值。水资源价值流主要表现在社会消费活动过程中，伴随着社会消费活动过程的是水资源的消费过程。水资源价值流是指隐含在商品中的虚拟水在经济社会中的流通、消费、回收、跨区域贸易等过程。典型的水资源价值流是从产品出厂开始，首先是产品进入市场的流通环节，其次是商品进入消费者手中进行消费的过程。随着产品的折旧和使用年限的递增，隐含在商品中的虚拟水也随之消耗。当产品经济寿命结束时，其残值可以被回收从而实现了产品中剩余虚拟水的回用。经济社会第三产业和居民生活是水资源价值流的主要载体。一般来说，第三产业和居民生活通过摄取实体水资源来提供某种服务或者满足某种需求，如餐饮行业用水主要是为消费者提供饮食服务，家庭生活用水主要是为饮用、清洁、洗涤等目的；同时在这个过程中，也会使用到大量的农产品和工业用品，这些产品中隐含的虚拟水资源也会被消费和利用。由此可见，第三产业和居民生活用水过程的本质是对实体水和虚拟水的消费和利用过程，是水资源价值流的具体表现。

需要特别指出，实体水-虚拟水流动的3段路径均伴随着对生态环境的影响和反馈作用。水资源物理流过程的失调会造成河湖水系的生态退化、局部气候的异常变化等衍生效应，因此水资源物理流的调控需要将气候、生态、环境的持续健康发展作为重要约束条件；水资源效用流对生态环境的反馈作用主要体现在商品的生产过程当中。该过程会产生大量的废污水，对环境生态带来很大的破坏。水足迹理论提出了生产灰水足迹的概念，用以衡量商品生产过程中对环境排放的污染物数量，通过该指标可以直观表达水资源效用流伴生的生态环境效应，为调控管理提供依据。水资源价值流流动过程同样会带来气候、环境、生态等负面效应。该过程需要从消费主体的角度进行控制，可从家庭、学校、事业单位、企业等用水主体单元入手，研究其污染物排放规律，并制定控制标准和调控方案。

3.3 实体水-虚拟水耦合流动过程控制方程

实体水-虚拟水的耦合流动规律是现代环境下水资源系统呈现出新的运动规律和演化模式。随着经济社会的繁荣发展和人类社会对水资源需求的持续增长，水资源的供需矛盾和涉水问题日益显现。这些问题概括起来主要是指水资源的可用性及其伴生的水环境系统健康性两

大方面。因此，水资源系统的科学管理和调控目的在于实现水资源的永续利用和伴生的水环境系统健康可持续发展。实体水-虚拟水耦合流动过程的状态表征重点关注实体水-虚拟水耦合流动过程的水量时空变化属性和水环境水生态的演变属性，即实体水-虚拟水耦合流动通量和环境影响效应。据此来说，实体水-虚拟水耦合流动系统的调控目标主要包括 3 个方面：一是系统内部的安全性，主要是指实体水-虚拟水耦合流动过程中的安全性和可靠性，包括实体水供水安全、虚拟水供给安全及虚拟水贸易安全等。二是系统运行的高效性。水资源管理的主要目标是提高单位水资源的利用效率。广义上，提高水资源利用效率不单单是提高其经济效益，同时要兼顾水资源在不同行业之间的合理分配，实现社会效益、经济效益、生态效益的协同提升。三是系统运行的外部低影响性，亦可称之为系统运行的可持续性。外部性是水资源系统的根本特征之一。在人类社会发展的初期，天然水循环通过长期自适应演变，形成了一种平衡可持续的水资源演变状态。实体水-虚拟水耦合流动规律的出现打破了这种平衡的可持续状态，水资源的无序开发和过度利用对资源、生态、环境等系统产生了诸多不利影响，破坏了水资源系统的可持续性。因此，水资源调控的目的是降低水资源开发利用过程中的负面外部影响效应，重建水资源系统新的可持续平衡状态。基于以上分析，本文以实体水过程流量、虚拟水过程流量、实体水-虚拟水转化效率以及伴生的资源环境生态影响效应作为关键表征参数，提出实体水-虚拟水耦合流动的三大表征方程。

3.3.1 水资源通量表征方程（安全性方程）

实体水-虚拟水耦合流动过程重点考察水资源的供给以及服务于国民经济发展的效用价值规律。因此，水资源通量表征主要表达区域实体水和虚拟水的供给量与区域的需求量之间的数量平衡关系。在一个相对独立的生产周期内（一般指一年），实体水通量表征方程如式（1）

$$\mathbf{RW} = \begin{bmatrix} \mathbf{RW}_a \\ \mathbf{RW}_i \\ \mathbf{RW}_d \\ \mathbf{RW}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_a + G_a + S_a + C_a \\ U_i + G_i + C_i \\ U_d + G_d + C_d \\ U_e + G_e + S_e + C_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-\eta_a}, 0, 0, 0 \\ 0, \frac{1}{1-\eta_i}, 0, 0 \\ 0, 0, \frac{1}{1-\eta_d}, 0 \\ 0, 0, 0, \frac{1}{1-\eta_e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{RD}_a \\ \mathbf{RD}_i \\ \mathbf{RD}_d \\ \mathbf{RD}_e \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， \mathbf{RW} 代表实体水-虚拟水耦合流动过程中实体水的供给通量，亿 m^3 ，属于四维向量，其分量可认为：向农业供水通量（ \mathbf{RW}_a ，亿 m^3 ），向工业供水通量（ \mathbf{RW}_i ，亿 m^3 ），向生活供水通量（ \mathbf{RW}_d ，亿 m^3 ）和向生态供水通量（ \mathbf{RW}_e ，亿 m^3 ）。其中， U_a ， G_a ， S_a 和 C_a 分别代表地表水、地下水、土壤水和再生循环水向农业的供水通量，亿 m^3 ； U_i ， G_i 和 C_i 分别代表地表水、地下水以及再生循环水向工业的供水通量，亿 m^3 ； U_d ， G_d 和 C_d 分别代表地表水、地下水以及再生循环水向生活的供水通量，

亿 m^3 ； U_e ， G_e ， S_e 和 C_e 分别代表地表水、地下水、土壤水和再生循环水向生态的供水通量，亿 m^3 。 η_a ， η_i ， η_d 和 η_e 分别代表实体水向农业、工业、生活和生态供水过程中的水分漏失率，%； \mathbf{RD}_a ， \mathbf{RD}_i ， \mathbf{RD}_d 和 \mathbf{RD}_e 分别代表农业、工业、生活和生态系统对实体水的需求量，亿 m^3 。需要指出，实体水供给安全性主要表现在水资源系统的输配水和生产环节。在满足资源的可利用性以及环境生态容量可承受的前提下，实体水的供给量如果能满足经济社会各个行业的用水需求，才能保证实体水供给系统的安全性。

虚拟水流动通量主要体现在经济社会的生产和消费环节，消费拉力是促进虚拟水发生流动的主要驱动力。在一个相对独立的消费周期内（一般指一年），虚拟水表征方程如式（2）

$$\mathbf{VW} = \begin{bmatrix} \mathbf{VW}_a \\ \mathbf{VW}_i \\ \mathbf{VW}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{AVW}_{in} + \mathbf{AVW}_p - \mathbf{AVW}_{out} - \Delta \mathbf{AVW} \\ \mathbf{IVW}_{in} + \mathbf{IVW}_p + \mathbf{IVW}_{rp} - \mathbf{IVW}_{out} - \Delta \mathbf{IVW} \\ \mathbf{LVW}_{in} + \mathbf{LVW}_p - \mathbf{LVW}_{out} - \Delta \mathbf{LVW} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中， \mathbf{VW} 代表实体水-虚拟水耦合流动过程中虚拟水的消费通量，亿 m^3 ，属于三维向量，其分量包括：农产品消费通量（ \mathbf{VW}_a ，亿 m^3 ）；工业产品消费通量（ \mathbf{VW}_i ，亿 m^3 ）和生活用品消费通量（ \mathbf{VW}_l ，亿 m^3 ）。 \mathbf{AVW}_{in} 代表区域通过农产品的进口带来的虚拟水的流入量，亿 m^3 ； \mathbf{AVW}_{out} 代表区域通过农产品的出口引起的虚拟水的流出，亿 m^3 ； \mathbf{AVW}_p 代表区域通过农产品的生产活动带来的虚拟水的净增加量，亿 m^3 ； $\Delta \mathbf{AVW}$ 代表消费周期内区域农产品存量虚拟水的蓄变量，亿 m^3 。 \mathbf{IVW}_{in} 代表区域通过工业品的进口带来的虚拟水流入量，亿 m^3 ； \mathbf{IVW}_{out} 代表区域通过工业品的出口引起的虚拟水流出量，亿 m^3 ； \mathbf{IVW}_p 代表区域通过工业品的生产活动带来的虚拟水净增加量，亿 m^3 ； \mathbf{IVW}_{rp} 代表通过工业品残值回收引起的虚拟水回收利用量，亿 m^3 ； $\Delta \mathbf{IVW}$ 代表消费周期内工业品存量虚拟水的蓄变量，亿 m^3 。 \mathbf{LVW}_{in} 代表区域通过生活消费品的进口带来的虚拟水流入量，亿 m^3 ； \mathbf{LVW}_{out} 代表区域通过生活消费品的出口引起的虚拟水流出量，亿 m^3 ； \mathbf{LVW}_p 代表区域通过生活消费品的生产活动新增的虚拟水量，亿 m^3 ； $\Delta \mathbf{LVW}$ 代表消费周期内生活消费品存量虚拟水的蓄变量，亿 m^3 。一般来说，工业消费品在经济寿命结束后存在的残值较大，其蕴含着客观的虚拟水量，可以用于虚拟水的回收再生产。而对于农业消费品和生活三产消费品来说，其经济寿命结束后基本上不存在残值，虚拟水回收的意义不大。因此，上述方程中只在工业品的虚拟水构成中增加了虚拟水回收通量过程。

3.3.2 水资源效益表征方程（高效性方程）

高效性是实体水-虚拟水耦合系统管理过程中追求的重要目标之一。水资源效益主要是指在经济生产环节中，以较少的水资源投入获得较大的产出效益。从广义上来讲，水资源效益不仅仅是指水资源的经济产出效益，还要考虑带来的社会效益和生态环境效益等综合效益。由此可见，水资源效益评估属于多目标优化的问题。本文

引入效用函数理论, 首先构建经济效益、社会效益和生态效益表征的综合效用函数, 进而通过求解效用函数的极值表征系统的高效性。具体表征方程见式(3)所示

$$H = U[f_e(w), f_s(w), f_n(w)] \quad (3)$$

式中, H 表示水资源系统的综合效益; $U[x, y, z]$ 为经济效益、社会效益和生态环境效益的综合表征函数, 即效用函数。效用函数是多目标评价的归一化目标函数, 受到量纲不统一、标准不统一和权重不统一的影响, 效用函数值很难通过单一的解析式来表达。实践中, 可以通过层次分析法、向量优化法等多目标优化方法进行求解。 $f_e(w)$ 代表水资源投入带来的经济效益目标函数, 一般可利用投入产出分析来解构水资源的经济效益; $f_s(w)$ 代表水资源投入带来的社会效益目标函数, 目标函数值可定为社会就业率满足程度, 即经济社会规模可支撑就业岗位满足社会劳动力的百分比; $f_n(w)$ 代表水资源投入带来的生态环境效益函数, 目标函数值可定为绿色当量面积, 绿色当量面积是指将林草、作物、水面以及人工绿化空间折算成的标准生态面积。

3.3.3 系统平衡状态表征方程(可持续性方程)

上文提到, 实体水-虚拟水耦合流动可持续性是指系统运行过程中的一种平衡特征。从资源、环境、经济生态协调发展的角度考虑, 系统的平衡主要包括: 实体水资源承载力与用水通量的平衡、自然环境容量与经济社会排污量的平衡以及生态用水通量与经济社会用水通量之间的用水竞争平衡等方面。据此, 实体水-虚拟水耦合流动的可持续性表征方程如式(4)所示

$$\mathbf{BLC} = \begin{bmatrix} \mathbf{BLC}_w \\ \mathbf{BLC}_e \\ \mathbf{BLC}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{TW}}{\mathbf{CAP}_{res}} \\ \frac{\mathbf{TP}}{\mathbf{CAP}_{env}} \\ \delta \cdot \frac{\mathbf{WU}_{eco}}{\mathbf{WU}_{soc}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 \mathbf{BLC} 表示实体水-虚拟水流动系统平衡指数, 无量纲, 为三维向量, 其分量包括: 实体水资源承载力与用水通量的平衡指数 (\mathbf{BLC}_w , 无量纲)、自然环境容量与经济社会排污量的平衡指数 (\mathbf{BLC}_e , 无量纲) 和生态用水通量与经济社会用水通量之间的用水竞争平衡指数 (\mathbf{BLC}_c , 无量纲)。 \mathbf{BLC}_w 可以通过总实体水取用量 (\mathbf{TW} , 亿 m^3) 与系统水资源承载能力 (\mathbf{CAP}_{res} , 亿 m^3) 的比值来表征; \mathbf{BLC}_e 可以通过总排污当量 (\mathbf{TP} , 万 t) 与系统环境承载容量 (\mathbf{CAP}_{env} , 万 t) 的比值来表征; \mathbf{BLC}_c 可以通过生态用水通量 (\mathbf{WU}_{eco} , 亿 m^3) 与经济社会用水通量 (\mathbf{WU}_{soc} , 亿 m^3) 的比值来表征, 其中引入参数 δ 对生态用水通量和经济社会用水通量之间的最优倍比关系进行修正。

4 结论与展望

虚拟水概念和相关理论的提出为保障区域、国家甚至全球的水资源利用安全提供了新的思路和方法^[30]。如何看待虚拟水理论在传统水文水资源学科发展中的地

位, 如何搭建虚拟水理论与传统水文水资源认知体系的统一框架, 目前学界还没有统一且成熟的认识。本文阐释了实体水-虚拟水耦合流动过程的基本认知, 并总结了其基本特征和规律。在现代环境下, 水资源具有显著的自然循环再生和经济效用价值双重属性。实体水-虚拟水耦合流动规律的本质, 一方面是实体水在自然-经济-社会系统中的传输、配置、调度过程, 是水资源的物流流; 另一方面是水资源作为生产资料在经济系统中从实体水向虚拟水的转化过程, 是水资源的效用流; 第三方面是水资源作为效用资源在社会系统中的价值实现过程, 即隐含在商品中的水资源以“流通-贸易-消费-回收再生产”为路径的虚拟水流动过程, 是水资源的价值流。在此基础上, 本文从社会文明的进化角度对水文水资源系统的演化和认知过程进行了阐述。水文水资源系统的演变特征先后经历了实体水“一元”运动模式、实体水“二元水循环”模式和实体水-虚拟水耦合流动模式, 伴随着社会文明的进步, 人类对水文水资源系统的认知范畴逐渐扩大, 作用域也从早期的自然系统向经济系统及社会系统扩展。文章的最后, 对实体水-虚拟水耦合流动的机制和过程路径结构进行了探讨, 提出了实体水-虚拟水耦合流动的状态表征方程, 为实现实体水-虚拟水耦合流动系统的高效调控和科学管理提供依据。

伴随着全球市场化和快速城市化的浪潮, 流域及区域水文水资源系统成为当代社会生产关系的重要构成部分, 其影响对经济社会的可持续发展具有重要作用。以“二维三元”为核心的实体水-虚拟水耦合流动的的认知框架从“自然-经济-社会”整个完整链条中认识水资源的运移转化规律, 揭示现代环境和经济社会繁荣发展条件下的水资源实体演化过程与水资源价值流动过程, 为协调人类经济社会用水与自然环境生态用水关系, 在更广视域下实现水资源的合理开发和优化利用提供坚实支撑。

[参 考 文 献]

- [1] World Water Assessment Programme. Water for a Sustainable World[R]. Paris: UNESCO, 2015.
- [2] 姜文来. 中国 21 世纪水资源安全对策研究[J]. 水科学进展, 2001, 12(1): 66—71.
Jiang Wenlai. Strategic study on Chinawater resources safety in the 21st century[J]. Advances in Water Science, 2001, 12(1): 66—71. (in Chinese with English abstract)
- [3] 王浩, 龙爱华, 于福亮, 等. 社会水循环理论基础探析 I: 定义内涵与动力机制[J]. 水利学报, 2011, 42(4): 379—387.
Wang Hao, Long Aihua, Yu Fuliang, et al. Study on theoretical method of social water cycle I: Definition and dynamical mechanism[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(4): 379—387. (in Chinese with English abstract)
- [4] 杨志峰, 支援, 尹心安. 虚拟水研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 181—190.
Yang Zhifeng, Zhi Yuan, Yin Xin'an. Research advances in virtual water[J]. Advances in Science and Technology of

- Water Resources, 2015, 35(5): 181—190. (in Chinese with English abstract)
- [5] 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(4): 260—265.
Cheng Guodong. Virtual water: A strategic instrument to achieve water security[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2003(4): 260—265. (in Chinese with English abstract)
- [6] 国务院南水北调工程建设委员会办公室. 世界上供水规模最大的调水工程之一: 南水北调工程[Z/OL]. http://www.nsb.gov.cn/zx/gczz/201106/t20110630_188241.html
- [7] 吴普特, 赵西宁, 操信春, 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.
Wu Pute, Zhao Xining, Cao Xinchun, et al. Status and thoughts of Chinese “agricultural north-to-south water diversion virtual engineering”[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(6): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [8] Allan J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible[J]. Priorities for Water Resources Allocation and Management, 1993, 13(4): 26.
- [9] 马静, 汪党献, A.Y. Hoekstra, 等. 虚拟水贸易在我国粮食安全中的应用[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 102—107.
Ma Jing, Wang Dangxian, A.Y. Hoekstra, et al. Application of the virtual water trade to China's grain security[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1): 102—107. (in Chinese with English abstract)
- [10] Hoekstra A Y. Virtual water trade: proceedings of the international expert meeting on virtual water trade[J]. Value of Water Research Report Series No.12, UNESCO-IHE, 2003.
- [11] Chapagain A K, 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.
- [12] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, et al. The water footprint assessment manual: setting the global standard[M]. London: Earthscan, 2011.
- [13] Montesinos P, Camacho E, Campos B, et al. Analysis of virtual irrigation water. Application to water resources management in a Mediterranean River Basin[J]. Water resources management, 2011, 25(6): 1635—1651.
- [14] 刘家宏, 秦大庸, 王浩, 等. 海河流域二元循环模式及其演化规律[J]. 科学通报, 2010, 55(6): 512—521.
Liu Jiahong, Qin Dayong, Wang Hao, et al. Dualistic water cycle pattern and its evolution in Haihe river basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(6): 512—521. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王建华, 王浩. 社会水循环原理与调控[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [16] 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.
- [17] WWAP (World Water Assessment Programme). The United Nations World Water Development Report2: Water: A Shared Responsibility[M]. Paris/New York, UNESCO/Berghahn Books, 2006.
- [18] 秦大庸, 陆垂裕, 刘家宏, 等. 流域“自然-社会”二元水循环理论框架[J]. 科学通报, 2014, 59(4/5): 419—427.
Qin Dayong, Lu Chuiyu, Liu Jiahong, et al. Theoretical framework of dualistic nature-social water cycle[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(4/5): 419—427. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王仁钟, 章为民, 蔡跃波, 等. 我国水利工程建设与管理[J]. 水利水电技术, 2001, 32(1): 31—34.
Wang Renzhong, Zhang Weimin, Cai Yuebo, et al. Hydro Project Construction and Management in China[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2001, 32(1): 31—34. (in Chinese with English abstract)
- [20] 酆建强, 王建生, 颜勇. 我国水资源安全现状与主要存在问题分析[J]. 中国水利, 2011, 23(10): 42—51.
Li Jianqiang, Wang Jiansheng, Yan Yong. Current situation of water security and analysis of major problem in China[J]. China Water Resources, 2011, 23(10): 42—51. (in Chinese with English abstract)
- [21] 张兆吉, 雒国中, 王昭, 等. 华北平原地下水资源可持续利用研究[J]. 资源科学, 31(3): 355—360.
Zhang Zhaoji, Luo Guozhong, Wang Zhao, et al. Study on sustainable utilization of groundwater in north china plain[J]. Resources Science, 2009, 31(3): 355—360. (in Chinese with English abstract)
- [22] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [23] Wu Pute, Wang Yubao, Zhao Xining, et al. Spatiotemporal variation in water footprint of grain production in China[J]. Front. Agr. Sci. Eng., 2015, 2(2): 186—193.
- [24] 张泽中, 黄强, 齐青青, 等. 云水资源及其计算方法[J]. 水利学报, 2007, 38(S1): 428—431.
Zhang Zezhong, Huang Qiang, Qi Qingqing, et al. Cloud water resources and its computing method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(S1): 428—431. (in Chinese with English abstract)
- [25] 刘宁. 泛流域的出现及认识[J]. 水科学进展, 2005, 16(6): 810—816.
Liu Ning. Study on the concept and connotation of Pan-Valley[J]. Advances in water science, 2005, 16(6): 810—816. (in Chinese with English abstract)
- [26] 彭少明, 王浩, 王煜, 等. 泛流域水资源系统优化研究[J]. 水利学报, 2013, 44(1): 10—17.
Peng Shaoming, Wang Hao, Wang Yu, et al. Study on the pan-basin optimization of water resources system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(1): 10—17. (in Chinese with English abstract)
- [27] 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.

- Liu Baoqin, Feng Zhiming, Yao Zhijun. Theory, method and progress on virtual water research[J]. Resources Science, 2006, 28(1): 120—127. (in Chinese with English abstract)
- [28] 王浩, 王建华, 秦大庸, 等. 基于二元水循环模式的水资源评价理论方法[J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1496—1502.
- Wang Hao, Wang Jianhua, Qin Dayong, et al. Theory and methodology of water resources assessment based on dualistic water cycle model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(12): 1496—1502. (in Chinese with English abstract)
- [29] Allan T. Virtual water: a long term solution for water short Middle Eastern economies?[M]. School of Oriental and African Studies, University of London, 1997.
- [30] Allan J A. Water Stress and Global Mitigation: Water Food and Trade, Arid lands Newsletter[EB/OL]. <http://ag.arizona.edu/OALS/ALN/aln45/allan.html>, 2002-06-20[2009-03-12].

Framework of “two-dimension three-element” coupling flow of real water and virtual water

Wu Pute^{1,2}, Gao Xuerui^{1,2}, Zhao Xining^{1,2}, Wang Yubao³, Sun Shikun³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Regions of China, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: With the background of changing environment and fast economic globalization, the regional hydrology and water resource system is experiencing profound changes. Under this new situation, to solve the problem of water scarcity and imbalance water associated with water cycle process, only relying on the traditional water resource planning, regulating and management is not enough. The concept of virtual water widens the cognitive scope of hydrology and water resources and enriches the ways to cope with water-related issues. However, it is still not clear about how to construct an integrated scientific framework combining the virtual water theory with the traditional hydrology and water resource theory, and how to consider the new evolution law of water resources in the entire natural, economic and social systems. The paper firstly presented a basic framework of real water and virtual water coupling flow effect. The coupling flow regime between real water and virtual water was a new important characteristic of the natural-social water resource system in the context of modern environment. Secondly, from the perspective of historical evolution, this study discussed the developing process of the hydrology and water resource system in human society. There were mainly 3 phases in the evolution process of water resource system since the birth of human civilization. In ancient time (before Industrial Revolution in 1760s), when the productive force level was low and the human's influence on water resource system was small, the driving force of water resource system was almost the natural power (e.g., gravity, solar energy). Thus the water flow route of water resource system in this phase could be defined as “one-dimension one-element” flow. The “one-dimension” mainly referred to the real water and the “one-element” referred to that the water flowing path of water resource system was only in the natural cycling route. After Industrial Revolution, the productive force level was greatly improved, and the human's influence on water resource system was correspondingly enhanced. Therefore, the water flow route of water resource system during this time was defined as “one-dimension two-element” flow. Here the “two-element” referred to that the water flowing path of water resource system was not only in the natural cycling route, but also in artificial canal systems. Nowadays, with fast development of economic globalization and international trade, there is not only a huge amount of real water exchanged through large water project, but also a large amount of virtual water embedded in commodities transported by trade among different regions of countries. As a consequence, the water flow route in the water resource system in the new conditions was defined as “two-dimension three-element” (2D-3E) flow. Here the “two-dimension” referred to real water and virtual water and the “three-element” referred to that the water coupling flowing path of the new water resource system included 3 routes (i.e., real water flowing route, real water being transformed to virtual water route, and virtual water flowing route in society). According to the above analysis, our research depicted the 2D-3E flowing route's structure in detail based on the coupling mechanism of real water and virtual water. At last, a set of equations to quantitatively characterize the coupling flow process were proposed, which could be a good tool for the combined regulation and management of real water and virtual water. On the whole, a preliminary theory of real water and virtual water coupling flow regime is established.

Keywords: water resources; couplings; models; real water; virtual water; two-dimension three-element (2D-3E)