区域主要作物生产实体水-虚拟水耦合流动过程解析与评价

吴普特^{1,2,4,5*}, 卓拉^{1,2,4,5}, 刘艺琳³, 高学睿^{1,2,4,5}, 王玉宝^{2,3}, 赵西宁^{1,2,4,5}, 孙世坤^{2,3}

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;
4. 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 杨凌 712100;
5. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100

* 联系人, E-mail: gjzwpt@vip.sina.com

2018-10-06 收稿, 2019-01-29 修回, 2019-02-12 接受, 2019-06-20 网络版发表

国家重点研发计划(2018YFF0215702)、国家青年人才项目(第14批)和国家自然科学基金(51809215)资助

摘要 水资源是粮食安全的刚性基础. 在农业生产过程中(产前、产中、产后)自然-经济-社会(三元)因素驱动下, 其水资源消耗形成实体水-虚拟水(二维)嵌入转化、互为反馈、相互影响的耦合流动过程. 本文基于实体水-虚拟水“二维三元”耦合流动理论, 集成构建了以水量为参数的区域作物生产广义实体水-虚拟水耦合流动过程量化方法, 并应用于我国“丝绸之路经济带”沿线西部六省, 对其1985~2013年主要作物实体水-虚拟水耦合流动过程进行解析与评价. 揭示了区域作物生产实体水-虚拟水耦合流动现象, 发现六省间水资源消耗与流动存在资源与经济效益的此消彼长现象. 表明以农田尺度实体节水为目标的资源单视角传统农业水资源管理理念, 已不足以实现多空间尺度水资源的资源-经济同步高效利用的管理目标, 而具有资源-经济-社会三重意义的区域农业全产业链实体水-虚拟水统筹管理应为有效解决思路. 基于此, 初步提出三点思考: (1) 现代农业节水应实体水-虚拟水统筹考虑; (2) 需加快突破农业生产实体水-虚拟水耦合流动量化、评价方法与调控关键技术; (3) 建议基于农业全产业链视角, 建立基于实体水-虚拟水二维度理论的农业水资源管理体系, 确保实现各阶段水资源管理“三条红线”.

关键词 实体水-虚拟水, “二维三元”, 作物生产, 水足迹, 西部六省

实体水-虚拟水“二维三元”耦合流动基本理论框架由吴普特等人^[1]在2016年提出. 这一理论框架揭示了农业生产(产前、产中、产后)耗水过程的自然、经济、社会现象. “二维”指实体与虚拟两个水流维度, “三元”指自然元、经济元和社会元所构成的人-水复杂系统. 实体水-虚拟水耦合流动过程包括三个层次^[1]: 第一层次, 水作为自然物质, 服从牛顿流体运动规律, 在自然-人工作用下形成以“降水-广义水资源(蓝-绿水)-取水-

耗用水-退排水”为基本路径的实体水循环, 形成“物理流”; 第二层次, 水作为生产资料, 服从经济生产过程中资源配置规律, 形成以“实体水摄取-实体水消耗(生产水足迹)-虚拟水嵌入”基本路径, 即实体水向虚拟水转化并嵌入产品的过程, 又称“效用流”; 第三层次, 嵌入产品的虚拟水作为社会消费主要资源, 在消费拉动力作用下, 随区域间商品流通形成“虚拟水流动(商品流通)-虚拟水回用(商品回收再生产)”的虚拟水运输路径,

引用格式: 吴普特, 卓拉, 刘艺琳, 等. 区域主要作物生产实体水-虚拟水耦合流动过程解析与评价. 科学通报, 2019, 64: 1953–1966

Wu P T, Zhuo L, Liu Y L, et al. Assessment of regional crop-related physical-virtual water coupling flows (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 1953–1966, doi: [10.1360/N972018-00997](https://doi.org/10.1360/N972018-00997)

同时产生相应的效益,是水资源最终经济社会价值的主要体现,可称为“贸易流”。

1992年在都柏林召开的国际水与环境会议上,明确了水资源综合管理(IWRM)的概念,强调了经济社会系统中各级用水户、规划者与政策制定者在以人-水-生态可持续为目标的水管理中的同等重要性,并首次明确了水资源具有经济价值这一水资源管理指导原则^[2]。随后一批新兴水资源概念涌现,如蓝水和绿水^[3]、虚拟水^[4]、水足迹^[5],拓展了人-水关系认知范畴与管理思路^[6]。2012年,Sivapalan等人^[7]提出社会水文学,将其定义为一门探究人水耦合系统的双向互馈方式及其协同进化动态机制的定量新学科,强调人类活动为水循环的内在动力,以实现流域水资源可持续利用为最终目的。虚拟水流动概念也被列为广义社会水文学范畴^[8]。然而,目前定量的社会水文学模型尚未考虑虚拟水流动对区域水资源的影响^[9]。虚拟水流动的量化仍相对独立,缺乏其与产前和产中实体水消耗之间互动关系的定量研究。实体水-虚拟水耦合流动理论最显著的特性是揭示全产业链人-水关系。实体水-虚拟水耦合流动概念的三层次分别对应全产业链产前、产中与产后三大环节,强调各环节的连续性和互作性,强调各环节实体水与虚拟水流动效率和效益对区域水安全的同等重要性。

农业是我国第一大用水户,农业水资源管理面临严峻挑战。一方面,农业水土资源空间不匹配使我国用水强度与结构存在显著区位差异。我国北方地区(长江、淮河以北地区)占全国51%的耕地面积,却仅拥有全国水资源量的19%^[10,11]。据《2016年中国水资源公报》,我国取用水量最大的两省为江苏省和新疆维吾尔自治区,因产业结构差异,农业用水量占比在两省分别为47%和94%。在农业用水不断增加与地表水资源量极其有限的双重压力下,新疆地下水取水量自2004~2006年增加了2倍,现已达到省取水总量的21%^[12]。另一方面,我们在不断推行节水灌溉技术的同时,往往会伴随灌溉用水“反弹效应”或“灌溉效率悖论^[13]”,即灌溉效率提高的节水效果可能被作物增产所带来的新增用水抵消^[13]。宋建峰等人^[14]参考能源反弹相关概念,提出了灌溉用水反弹效应强度由反弹用水量(即灌溉技术升级后的预期节水量与实际节水量之差)与灌溉预期节水量之比来表达。介于0~100%之间的反弹效应就意味着没有完全达到预期的节水目标。1998~2014年我国作物水分生产效率提高了约2倍,但伴随的灌溉水反弹效

应高达61.49%^[15]。与此同时,我国平均每位公民消费食物所消耗的水资源中,有35%是通过虚拟水流动来自于其所在省外地区^[16]。在当前国内粮食供需结构下,“北粮南运”伴生的“农业北水南调虚拟工程”正在持续扩张,该工程在2012年虚拟水调运量已达826亿 m^3 ,大于黄河水资源总量,远大于南水北调实体工程目前的调水规模^[10,17]。从资源禀赋视角,在消费需求驱动下,虚拟水北水南调需求增加了北方缺水粮食主产区的用水压力,同时也拉大了南北方地区间经济差距,威胁我国水安全。粮食调运对交通系统也会造成压力,秋冬季节远距离粮食运输发生不必要的粮食霉变或营养损失等情况,威胁我国粮食安全^[18]。

目前我国仍执行传统农业实体蓝水资源管理模式,重视灌溉水(蓝水)产前配置(开源)与产中高效利用(节流)。2016年12月,水利部等九部门联合印发的《“十三五”实行最严格水资源管理制度考核工作实施方案》中,设置了包括用水总量控制、用水效率控制及水功能区限制纳污3类目标6项指标,旨在提高实体蓝水的用水效率与水质、减少和控制实体蓝水用量。然而,自1997年Falkenmark^[3]提出“蓝水”与“绿水”概念^[3],农业水管理分析与决策范式发生变革。从水资源类型与范畴角度,绿水(降雨)与蓝水构成农业广义水资源,二者相互制约与影响,形成区域农业耗水连续谱系^[19],二者的高效利用与管理同等重要。从区域全产业链角度,由产前种植结构与水资源配置、产中节水直接影响的实体水消耗,及产后贸易消费所形成的虚拟水流动,都决定着区域水资源利用效率。现行的传统重蓝水、重实体水供水工程节水及产中节水的农业水资源管理制度已经无法完全解决区域的农业水资源问题。水资源的科学管理应将实体水-虚拟水统筹考虑,特别是农业水资源管理。广义水资源视角下,区域农业实体水-虚拟水耦合流动过程的量化与评价是实现区域实体水-虚拟水统筹管理与调控的重要基础。

我国“丝绸之路经济带”沿线西部六省(陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区、内蒙古自治区),地处干旱半干旱地区,水资源是制约当地可持续发展的最大瓶颈。六省份面积占全国45%,水资源量仅占全国10%,2016年农业用水总量占全国24%,农业取水比例为65%(陕西)~95%(新疆)^[12],农业生产水资源供需矛盾突出。

本文基于实体水-虚拟水“二维三元”耦合流动理论,集成构建区域作物生产全产业链实体水-虚拟水耦

合流动过程量化方法,以西部六省为研究区域,对1985~2013年10种主要作物(小麦、玉米、大豆、稻谷、花生、马铃薯、棉花、苹果、葡萄和向日葵)生产(产前、产中、产后)实体水-虚拟水耦合流动过程进行逐年量化与评价,并进一步探讨区域农业全产业链实体水-虚拟水统筹管理关键技术与研究热点。

1 区域作物生产实体水-虚拟水耦合流动过程量化方法

区域作物生产实体水-虚拟水耦合流动过程的量化,其核心为定量表征区域作物生产实体水-虚拟水耦合流动三阶段——物理流、效用流及贸易流。

1.1 作物产前与产中实体水物理流的定量表征

产前与产中实体水物理流可用区域水量平衡方程表达:

$$PR_i + IRR_i = WF_{g,i,prod} + WF_{b,i,prod} + RF_i \quad (1)$$

式中, $PR_i(m^3)$ 指田间降水量, $IRR_i(m^3)$ 为灌溉供水量, $WF_{g,i,prod}(m^3)$ 和 $WF_{b,i,prod}(m^3)$ 分别为农作物生产过程绿水与蓝水足迹,两者之和为作物生产耗水总量,属于消耗型物理流, $RF_i(m^3)$ 表示田间降水和灌溉被有效消耗后的剩余流,包括地表径流、土壤下渗及排水。

1.2 作物产中实体水-虚拟水转化效用流的定量表征

对于作物生产过程中的实体水-虚拟水转化效用流,由作物单位产量(kg/ha)或单位产值(元/kg)生产消耗型水足迹(uWF)表征,单位为 m^3/t ,由田间绿水足迹(uWF_g)、田间蓝水足迹(uWF_{b_f})及灌溉输配水损失蓝水足迹(uWF_{b_e})构成。

$$uWF = uWF_g + uWF_{b_f} + uWF_{b_e} \quad (2)$$

田间绿水足迹等于作物生长期被作物有效利用的田间降水,田间蓝水足迹为作物实际耗用的灌溉水量,两者之和为田间作物实际蒸散量(ET)。目前应用较为广泛的田间 ET 中绿水与蓝水区方法主要包括有效降雨法^[20]与土壤动态水分平衡法^[21]。灌溉输配水损失蓝水足迹等于区域灌溉输配水量(总灌溉用水量)与该区域输配水工程损失系数之积。可在已知作物田间蓝水足迹的基础上,根据灌区灌溉水利用系数获得(包括田间灌溉用水量与灌溉水损失量)^[22,23]。

$$uWF_{b_e} = \frac{uWF_{b_f}}{\eta} - uWF_{b_f} \quad (3)$$

式中, $uWF_{b_e}(m^3/t)$ 指灌溉输配水损失蓝水足迹, $\eta(\%)$ 指灌溉水利用系数。本文研究案例将采用“速达法”(fast track)^[24]和基于区域用水量的灌溉输配水损失蓝水足迹进行田间蓝、绿水足迹以及灌溉输配水损失蓝水足迹的量化。“速达法”是基于作物单位生产水足迹与单产水平呈负线性相关关系的原理,以特定年份作物生产水足迹数据库推算多年份作物生产水足迹量级的快速方法,由以下公式表达:

$$uWF(t) = \frac{uWF(T) \times Y(T)}{Y(t)} \quad (4)$$

式中, $uWF(t)$ 与 $uWF(T)(m^3/t)$ 分别为某作物 t 年与 T 年单位生产水足迹, $Y(t)$ 与 $Y(T)(t/ha)$ 分别为该作物 t 年与 T 年单位面积产量。Tuninetti等人^[24]通过全球尺度不确定分析验证该方法误差在10%以内。因具有计算成本低、结果可靠性高的特点,该方法在国际上已得到广泛应用^[25,26]。

1.3 作物产后贸易流的定量表征

由产后农作物产品消费拉力驱动的贸易流大小——区域间农产品虚拟水流动量,由区域间农产品流通量及流通产品虚拟水含量(即输出地该产品单产水足迹)决定。由于我国省际间作物流通数据短缺,省际间农产品流动格局往往需要基于区域贸易净平衡,进行模拟量化,受到普遍认可的方法包括投入产出法^[27,28]、就近原则法^[29]及最低运输成本法^[30]。本文研究案例采用最低运输成本法进行虚拟水格局量化:基于各省每年各作物产品的供需平衡,同时考虑国际与国内各省之间作物流通,以运输成本最低为约束条件,利用线性规划方法得到相应的省际间作物流通量(t/a):

$$\begin{cases} \min(f = \sum_{i=1}^{31} \sum_{j=1}^{31} T_{ij} \times c_{ij}), \\ \sum_{j=1}^{31} T_{ij} \leq S_i, i = 1 \dots 31, \\ \sum_{i=1}^{31} T_{ij} = D_j, j = 1 \dots 31, \\ T_{ij} \geq 0, \end{cases} \quad (5)$$

式中, T_{ij} 是 i 省运输到 j 省的某一产品贸易量(t/a), c_{ij} 是单位作物产品从 i 省运输到 j 省所需的成本(元/ t), f 代表运输总成本(元), S_i 是 i 省作物产品可流出量(t/a), D_j 是 j 省

的作物产品需流入量(t/a). 相应年份*i*省到*j*省作物*p*的虚拟水流通量 $VW_{ij,p}$ (m^3/a)可由各省作物通过当年*i*省*p*作物产品贸易流动量 $T_{ij,p}$ (t/a)与*i*省单位*p*作物单位生产水足迹 $WF_{i,p}$ (m^3/t)相乘得到:

$$VW_{ij,p} = T_{ij,p} \times WF_{i,p}. \quad (6)$$

1.4 数据及来源

本文研究案例聚焦西部六省主要作物,在贸易流量化过程所需1985~2013年全国各省人口、各作物单位面积产量、播种面积、总产量统计数据,均来源于国家统计局国家数据网^[12]. 各作物每年国际贸易数据来自联合国粮食及农业组织数据库(FAOSTAT)(<http://www.fao.org/faostat/en>). 作物生产水足迹量化“速达法”所需的各省各作物2000年水平单位生产蓝、绿水足迹数据来自国际水足迹网络数据库(WaterStat)(<http://waterfootprint.org/en/resources/waterstat>),该数据库基于空间分辨率为10 km×10 km的作物生产水足迹核算结果.

2 结果与分析

本文对1985~2013年我国“丝绸之路经济带”沿线六省主要作物生产实体水-虚拟水耦合流动过程进行了量化与评价,所选作物在2013年水平占六省作物与水果总产量的81%^[12]. 各省作物生产(产前、产中、产后)物流、效用流与贸易流分别由作物生产总水足迹(m^3/a)、作物单产水足迹(m^3/t)与省际间虚拟水流动(m^3/a)表征.

2.1 西部六省作物生产物流——生产总水足迹

1985~2013年,西部六省地区主要作物总产量增长了2.5倍,总生产水足迹涨幅仅为58%,由614亿 m^3/a 增至971亿 m^3/a ,体现了农业水分生产效率提高(即作物单产水足迹减小)对减缓水足迹增长的积极作用. 2013年西部六省作物生产水足迹蓝绿水构成如图1所示:西部六省作物水足迹中蓝水足迹占比为53%,其中输配水损失蓝水足迹与田间蓝水足迹基本相当,占总水足迹的26%.

由于各省间作物种植结构、生产规模、农业用水技术的差异及发展程度不同,各省作物生产水足迹量级、构成及年际发展趋势存在明显差异. 图2所示为1985, 1995, 2005和2013年西部六省作物生产总水足迹

图1 (网络版彩色)2013年西部六省主要作物生产水足迹蓝绿水的构成

Figure 1 (Color online) The construction of total annual water footprint of main crop production in the six western provinces in 2013

及相应构成. 即使单位产量作物生产水足迹逐年下降,随作物种植规模扩大,除青海省因向日葵与小麦种植规模减小而致其作物生产总水足迹下降39%,其余各省作物生产水足迹在研究年限间具有不同程度的上升趋势. 内蒙古由于棉花、花生等经济作物种植规模不断增加,其作物总水足迹较其他省份在研究年限内增幅最大(为2.4倍). 新疆气候极度干旱少雨,潜在蒸散发较大,作物耗水需求高,当地作物生长更依赖蓝水资源. 因此,新疆地区作物生产总水足迹量级一直为六省中最大,其输配水损失蓝水足迹比重也为六省最大,2013年新疆输配水损失蓝水足迹占总水足迹的比重达38%.

2.2 西部六省作物生产效用流——作物单产水足迹

在农业生产水平发展驱动下,作物单产增加使西部六省主要作物单位生产水足迹在研究时段内不同程度减小(图3). 10种主要作物中,向日葵在1995年后超过棉花成为单产水足迹最高的作物,其2005~2013年多年平均单产水足迹为2605 m^3/t . 如表1所示,将各省份同一作物单位生产水足迹进行比较,新疆省作物单产水足迹最大,陕西省最小. 导致这种现状的主要原因有两个,一是各省农业水资源利用效率之差异;二是新疆地区因为日照强度高,导致其作物蒸发蒸腾量远高于其他省份,而陕西省的作物蒸发蒸腾量则为西部六省中最低^[31].

2.3 西部六省作物生产贸易流——省际间虚拟水流动

一个地区的产品消费需求及其生产结构决定着该

图2 (网络版彩色)西部六省主要作物生产总水足迹省际分布图

Figure 2 (Color online) Spatial distribution of annual total water footprint of main crop production in the six western provinces

图3 (网络版彩色)西部六省主要作物单位生产水足迹(1985–2013年)

Figure 3 (Color online) Unit water footprint of main crop produced in six western provinces (1985–2013)

地区与其他地区间虚拟水流向, 产品输出区的单产水足迹决定着虚拟水流动规模。因承担着我国小麦、玉米和棉花等作物的主要生产任务, 西部六省整体在研究时间段内一直为虚拟水净输出地区。六省整体虚拟水净输入量以及其蓝、绿水构成年际演变趋势如图4(a)所示。1985年西部六省虚拟水净输出为40.27亿 m^3/a , 其中主要输入绿水、输出蓝水, 这与西部地区干旱少雨, 作物生长依赖灌溉不无关系。随着玉米、棉花和苹

果种植规模及产量的不断提升, 虚拟水输出量呈上升趋势。2013年虚拟水输出量达到227亿 m^3/a , 占当年作物生产总水足迹23.4%。西部六省整体主要因输入稻谷、花生和大豆伴生虚拟水输入, 其量级在29年间变化不大, 而嵌入输出的玉米、棉花、苹果和向日葵的虚拟水输出规模不断扩大, 如图4(b)所示。2013年棉花在虚拟水输出中比重最大, 占当年西部六省虚拟水输出量的36%。

表 1 西部六省主要作物产品单产水足迹(单位: m^3/t)
Table 1 The water footprints per unit mass of major crop production in six western provinces (unit: m^3/t)

作物	省份	1985年				1995年				2005年				2013年			
		田间绿 水足迹	田间蓝 水足迹	输配水损失 蓝水足迹	输配水损失 蓝水足迹	田间绿 水足迹	田间蓝 水足迹	输配水损失 蓝水足迹	输配水损失 蓝水足迹	田间绿 水足迹	田间蓝 水足迹	输配水损失 蓝水足迹	输配水损失 蓝水足迹	田间绿 水足迹	田间蓝 水足迹	输配水损失 蓝水足迹	输配水损失 蓝水足迹
小麦	内蒙古	1215	1289	1262	755	801	784	625	663	616	654	640	640	616	654	640	640
	陕西	784	311	306	764	303	298	592	234	550	218	215	215	550	218	215	215
	甘肃	864	765	718	977	866	812	691	613	629	558	523	523	629	558	523	523
	青海	845	610	623	786	568	579	653	472	704	508	519	519	704	508	519	519
	宁夏	762	770	785	675	682	696	550	555	508	513	524	524	508	513	524	524
玉米	新疆	1047	2153	2197	623	1281	1307	479	986	480	986	1006	1006	480	986	1006	1006
	内蒙古	948	269	263	668	189	185	591	167	535	151	148	148	535	151	148	148
	陕西	910	26	25	892	25	25	666	19	555	16	15	15	555	16	15	15
	甘肃	786	300	282	738	282	265	523	200	458	175	164	164	458	175	164	164
	青海							517	50	598	58	60	60	598	58	60	60
大豆	宁夏	895	521	531	560	325	332	526	306	455	265	270	270	455	265	270	270
	新疆	946	1495	1525	580	917	935	440	696	434	686	699	699	434	686	699	699
	内蒙古	2073	261	255	2895	364	356	1662	209	1287	162	158	158	1287	162	158	158
	陕西	2360	251	248	2509	267	263	2800	298	1310	140	137	137	1310	140	137	137
	甘肃	2348	372	349	3038	481	451	2010	318	1556	246	231	231	1556	246	231	231
稻谷	青海																
	宁夏	1064	478	488	1638	736	751	2150	966	2477	1113	1136	1136	2477	1113	1136	1136
	新疆	1576	4426	4515	1180	3314	3381	927	2605	902	2533	2584	2584	902	2533	2584	2584
	内蒙古	789	1115	975	520	734	643	356	503	355	501	439	439	355	501	439	439
	陕西	560	344	303	685	421	371	521	320	430	264	232	232	430	264	232	232
花生	甘肃	751	723	604	445	428	358	430	414	478	461	385	385	478	461	385	385
	青海																
	宁夏	275	741	678	311	839	766	270	728	276	744	680	680	276	744	680	680
	新疆	399	1951	1783	254	1245	1137	211	1032	184	901	824	824	184	901	824	824
	内蒙古	0	0	0	1540	192	188	2108	263	1554	194	190	190	1554	194	190	190
花生	陕西	1762	64	64	2036	75	73	1454	53	1265	46	46	46	1265	46	46	46
	甘肃	2703	8	7	1418	4	4	1766	5	762	2	2	2	762	2	2	2
	青海																
	宁夏																
	新疆	3581	2286	2332	2113	1349	1376	2250	1436	958	612	624	624	958	612	624	624

(续表1)

作物	省份	1985年						1995年						2005年						2013年					
		田间绿 水足迹	田间蓝 水足迹	输配水损失 蓝水足迹	输配水损失 蓝水足迹	田间绿 水足迹	田间蓝 水足迹	田间绿 水足迹	田间蓝 水足迹	输配水损失 蓝水足迹	输配水损失 蓝水足迹	田间绿 水足迹	田间蓝 水足迹	田间绿 水足迹	田间蓝 水足迹	输配水损失 蓝水足迹	输配水损失 蓝水足迹	田间绿 水足迹	田间蓝 水足迹	田间绿 水足迹	田间蓝 水足迹	输配水损失 蓝水足迹	输配水损失 蓝水足迹	田间绿 水足迹	田间蓝 水足迹
		水足迹	水足迹	水足迹	水足迹	水足迹	水足迹	水足迹	水足迹	水足迹	水足迹	水足迹	水足迹	水足迹	水足迹	水足迹	水足迹	水足迹	水足迹	水足迹	水足迹	水足迹	水足迹	水足迹	水足迹
马铃薯	内蒙古	293	29	28	28	301	30	229	22	29	22	189	19	22	22	22	18	189	19	189	19	22	18	189	19
	陕西	283	6	5	5	284	6	386	7	5	7	195	4	386	7	7	4	195	4	195	4	7	4	195	4
	甘肃	247	8	7	7	236	8	126	4	7	4	128	4	126	4	4	4	128	4	128	4	4	4	128	4
	青海	235	25	26	26	162	17	148	16	18	16	166	18	148	16	16	18	166	18	166	18	16	18	166	18
棉花	宁夏	387	37	38	38	259	25	186	18	25	18	213	21	186	18	18	21	213	21	213	21	18	21	213	21
	新疆	296	410	419	223	157	218	172	238	223	243	143	199	172	238	243	203	143	199	143	199	243	203	143	199
	内蒙古			327	269	2184	273	4664	396	269	388	3584	304	4664	396	388	298	3584	304	3584	304	388	298	3584	304
	陕西	1331	2334	2189	1522	925	1623	1080	135	1522	1121	680	1193	1080	135	133	93	680	1193	680	1193	133	93	680	1193
苹果	甘肃																								
	青海																								
	宁夏																								
	新疆	1878	1825	1862	1044	1053	1024	872	848	1044	865	688	669	872	848	865	682	688	669	688	669	865	682	688	669
葡萄	内蒙古	595	188	184	289	935	295	445	140	289	138	149	47	445	140	138	46	149	47	149	47	138	46	149	47
	陕西	327	14	332	273	269	234	133	560	273	135	93	943	133	560	135	95	93	943	93	943	135	95	93	943
	甘肃	828	18	17	25	1250	27	519	11	25	11	308	7	519	11	11	6	308	7	308	7	11	6	308	7
	青海																								
向日葵	宁夏	1087	179	182	284	1694	278	439	72	284	74	418	69	439	72	74	70	418	69	418	69	74	70	418	69
	新疆	1862	13	1825	1024	1044	24	865	33	1024	848	682	98	865	33	848	669	682	98	682	98	848	669	682	98
	内蒙古	785	81	80	65	642	67	648	67	65	66	291	30	648	67	66	30	291	30	291	30	66	30	291	30
	陕西	3911	52	51	9	674	9	538	7	9	7	358	5	538	7	7	5	358	5	358	5	7	5	358	5
向日葵	甘肃	7453	340	318	27	622	28	399	18	27	17	2054	16	399	18	17	15	2054	16	2054	16	17	15	2054	16
	青海																								
	宁夏	734	67	69	21	222	20	178	16	21	17	215	20	178	16	17	20	215	20	215	20	17	20	215	20
	新疆	952	775	790	276	332	270	404	329	276	336	350	285	404	329	336	290	350	285	350	285	336	290	350	285
向日葵	内蒙古	2792	267	262	188	2005	192	1909	183	188	179	1694	162	1909	183	179	159	1694	162	1694	162	179	159	1694	162
	陕西	2603	75	74	52	1817	52	1416	41	52	40	1037	30	1416	41	40	29	1037	30	1037	30	40	29	1037	30
	甘肃	1439	431	404	478	1701	509	1936	580	478	544	1135	340	1936	580	544	319	1135	340	1135	340	544	319	1135	340
	青海																								
向日葵	宁夏	2314	916	934	828	2050	811	1528	605	828	617	1179	466	1528	605	617	476	1179	466	1179	466	617	476	1179	466
	新疆	2530	2069	2110	1543	1850	1513	1497	1224	1543	1249	1335	1092	1497	1224	1249	1114	1335	1092	1335	1092	1249	1114	1335	1092

图4 (网络版彩色)1985~2013年西部六省作物虚拟水净输入量蓝绿水构成(a)及各作物虚拟水净输入年际变化(b)

Figure 4 (Color online) Inter-annual variations in the construction (a) and crop contributions (b) in the net virtual water import of the six western provinces over the period 1985–2013

在西部六省省际间虚拟水流动格局中, 1985年虚拟水输入地区为内蒙古、甘肃和青海, 其中青海虚拟水输入量最大为28亿 m^3/a ; 虚拟水输出地区为陕西、宁夏和新疆, 其中新疆1985年虚拟水输出量最大, 为96亿 m^3/a , 占当年新疆作物生产总水足迹36%. 到2013年, 西部六省省际间虚拟水流动量已达作物总生产水足迹的9%; 内蒙古由虚拟水净输入地区转变为了净输出地区, 西部六省主要输出地区为内蒙古、陕西、宁夏和新疆. 其中, 新疆仍旧是西部六省中最大的虚拟水净输出省份, 当年虚拟水净输出量增至209亿 m^3/a , 超过新疆作物生产总水足迹51%(图5).

由以上分析, 西部六省有较为显著的区域作物生产实体水-虚拟水耦合流动现象. 图6以传统水资源管理对象蓝水为例, 描述了2013年西部六省作物生产蓝水实体水-虚拟水耦合流动. 由产前阶段依据种植结

构、灌溉定额等指标规划制定的灌溉供水量中, 48%作为蓝水足迹在产中阶段被作物消耗, 其中49%为灌溉输配水损失蓝水足迹; 伴随着产后不同地区间作物流通, 31%蓝水足迹通过虚拟水输出形式输出西部六省外, 而14%蓝水足迹在六省省际间以虚拟水形式流动, 总体有45%的作物生产实体蓝水消耗最终转化为虚拟水流动.

3 讨论

通过量化解析西部六省作物实体水-虚拟水耦合流动过程, 我们清晰认识到农业全产业链实体水-虚拟水耦合流动已是不争事实, 产业链中每一个环节都直接(通过实体水消耗)或间接(通过虚拟水流动)地影响区域水资源利用效率、甚至经济效益, 同时各环节水资源消耗或流动都紧密关联, 相互作用.

图 5 (网络版彩色)1985与2013年西部六省内省际间作物虚拟水流通格局
Figure 5 (Color online) Inter-provincial crop-related virtual water flows within the six western provinces for the years of 1985 and 2013

图 6 (网络版彩色)2013年西部六省作物生产蓝水实体水-虚拟水耦合流动示意图. 单位: 亿 m^3/a
Figure 6 (Color online) The sketch of the physical-virtual blue water coupling flow along the production chain of crops in the six western provinces in China (2013). Unit: $10^8 \text{ m}^3/\text{a}$

传统区域水资源管理往往以减少实体水消耗为管理目标^[13], 而由实体水-虚拟水耦合流动角度看, 如果虚拟水得到合理配置, 可形成“虚拟水战略”, 间接解决区域水资源短缺问题. 区域间虚拟水流动具有非真实性、社会交易性及便捷性三大特征^[32]. 与实体水调水工程相比最大优势为调水成本低, 受产品交易价格与区域间水生产力差共同作用, 甚至可以提高输出地区水资源价值, 产生经济效益, 成为提高区域水资源效率的有效工具和措施^[29]. 虚拟水战略是指贫水国家或地区通过贸易的方式从富水国家或地区购买水密集型农产品来获得本地区水和粮食的安全^[33].

虚拟水流动的可持续及高效性可从资源与经济两个视角综合评价. 若区域间虚拟水流动由水分生产率较高地区流入较低地区, 可产生间接节水, 即该虚拟水流动为资源可持续^[34]; 输入地与输出地价格差及虚拟水含量形成虚拟水流动经济效益(净收入), 若输出地获得正净收入, 则表示该虚拟水流动经济可持续:

$$NI(VW_i) = \sum(E_i \times V_E) - \sum(I_i \times V_I), \quad (7)$$

式中, $NI(VW_i)$ (元/a) 为由 i 省虚拟水流动产生的经济效益; E_i 和 I_i 分别表示 i 省作物出口与进口量(t/a); V_E 和 V_I 分别表示对应 i 省当地作物价格与其进口地区作物价格

(元/t).

就西部六省主要作物虚拟水流动而言, 资源上1985~2013年间接节约绿水(图7), 而从2000年开始损失蓝水, 从2008年开始变为净间接水损失. 通过对各作物贡献分析发现, 西部六省作物虚拟水间接水损失主要由小麦、玉米从水分生产力较低省份向水分生产力较高省份流动导致: 小麦主要由单产水足迹及蓝水足迹比例相对较高的新疆流入到其他省份; 与此同时, 玉米种植规模的不断扩大, 使宁夏连年输出水分生产率相对其他省份较低的玉米(宁夏玉米单产水足迹为西部六省第二高); 经济上(图8), 最大虚拟水净输出省新疆通过输出棉花、葡萄等高价作物, 虽然大量虚拟水输出给当地水资源产生巨大压力, 但同时获得显著经济效益, 2013年其在西部六省间作物虚拟水流动中获净经济效应达3.14亿元. 而另一类在水资源、经济角度都面临来自作物流通产生的压力的现象发生在内蒙古和宁夏: 在虚拟水净输出的情况下, 因相关输出作物主要为价格较为低廉的玉米、小麦等大宗作物, 同时输入其他相对高价的经济作物, 导致作物虚拟水流动净经济效应为负.

显然, 传统的以减小产中农田蒸散量、保持或提高产量最终提高田间水利用率与提高输配水效率为目标的农业节水思路, 只能解决全产业链中产中实体水消耗高效性问题. 上述分析表明: 区域种植结构、用水强度及作物市场价格综合决定区域间作物虚拟水流动

可持续性, 且虚拟水流动资源与经济可持续性存在此消彼长现象. 这提醒我们, 如何实现水资源的资源与经济效率共赢是实体水-虚拟水耦合流动调控与管理面临的新的核心问题.

4 结论

本文基于实体水-虚拟水“二维三元”耦合流动理论, 集成构建了区域作物生产广义实体水-虚拟水耦合流动过程量化方法, 并应用于“丝绸之路经济带”沿线西部六省, 定量解析1985~2013年各省主要作物从生产到消费全产业链消耗型物理流(实体水消耗)、效用流(虚拟水嵌入)及贸易流(省际间虚拟水流动), 揭示了区域作物生产实体水-虚拟水耦合流动现象, 发现西北六省间水资源消耗与流动存在资源与经济效益此消彼长现象. 以农田尺度实体节水为目标的资源单视角传统农业水资源管理措施, 有效提高了我国农田灌溉水有效利用系数(从2000年0.43提高到2016年0.542), 但在当地消费与贸易活动经济利益驱动下, 灌溉面积的扩大与高耗水高价值作物的大量种植, 反而增加了农业总耗水^[13,14], 使农田以上空间尺度水资源效率下降, 人类耗水回流减少^[13]. 而这一现象背后水资源的流动形态正是具有物理-经济-社会三重意义的全产业链实体水-虚拟水耦合流动. 只有实现农业全产业链实体水-虚拟水统筹管理, 对全产业链每一环节水资源实体水与虚拟水流动效率进行有效配置与调控, 才可能同时实现

图7 (网络版彩色)西部六省作物虚拟水流动间接节水量及其蓝绿水构成(1985~2013年)

Figure 7 (Color online) Inter-annual variations in the construction of the water saving through the crop-related virtual water flows across the six western provinces over the period 1985–2013

图8 (网络版彩色)2013年西部六省省际间作物虚拟水流动净经济效应

Figure 8 (Color online) The net economic incomes per province through crop-related inter-provincial virtual water flows of the six western provinces in the year of 2013

不同物理空间尺度水资源与经济高效利用,保障水安全这一粮食安全刚性基础,从而实现区域和国家安全及可持续发展。

因此,本文就我国农业节水发展方向和研究热点初步提出以下3点思考。

(1) 现代农业节水应着眼于全产业链广义水资源高效利用。通过综合管理和提高农业全产业链产前、产中、产后三大环节水资源配置与利用效率,从“产前适水规划、产中高效节水、产后多元补偿”三方面入手,在保障或提高粮食生产能力与促进农业产地经济发展水平的前提下,实现区域广义农业水资源(蓝水与绿水)高效利用。在产前环节的种植结构规划过程中,一方面需做到以水定产、以需定产;另一方面可通过农业与水资源综合经济效益分析,根据当地经济发展需求进一步优化种植结构,这一步也事关产后贸易结构的优化。在产中环节,即现有节水农业关注环节,进一步加大农业技术推广应用及节水抗旱品种应用,提高灌溉水利用效率;与此同时,绿水节水技术的研发也同等重要,提高绿水利用效率,不仅可直接提高旱作农业生产力,也可提升区域生态用水安全系数。在产后环节,加强虚拟水流动评价与调控机制,从资源禀赋和经济效应两方面,建立虚拟水输入地对输出地的多元补偿办法。如粮食调入省份将粮食调入量换算为虚拟水量,同时考虑输入地区水资源短缺程度与作物产品价格导致的贸易经济逆差,制定相应增值贸易税或交易税以作为补偿。在虚拟水流动调控过程中,也要注意膳食结构改善对贸易结构变化的影响。

(2) 突破农业实体水-虚拟水耦合流动管理关键技术和方法。农业全产业链“二维三元”实体水-虚拟水耦合流动管理关键技术,是厘清全产业链水资源“物理流”、“效用流”、“贸易流”中的人-水关系。首先,要建立统一的区域农业实体水-虚拟水耦合流动过程量化方法。本文所提方法针对以水量为核心的区域农业实体水-虚拟水耦合流动过程量化。可进一步在此基础上构建以水质评价为核心的量化技术,完善实体水-虚拟水耦合流动量化方法体系。其次,要建立面向全产业链各环节水资源量、质与效的实体水-虚拟水耦合流动过程评价方法或指标体系。目前被广泛应用的评价指标仍侧重于实体水蓝水和水量的评价,如蓝水资源短缺度。亟需在实体水-虚拟水耦合流动评价中完善对绿水、虚拟水流动及水质的评价指标体系。再次,要建立农业全产业链实体水-虚拟水耦合流动优化配置方法,其关键技术为统筹考虑实体水、虚拟水的水资源配置技术。与传统区域蓝水资源优化配置技术相比,实体水-虚拟水耦合流动系统的调控目标需同时满足3个方面^[1]:一是系统内部安全性,即同时保证实体水消耗与虚拟水流动不超出水资源系统可持续承载力;二是系统的高效性,即蓝水与绿水资源利用效率最高,同时达到最佳经济效益;三是系统运行的外部低影响性,即保证人类活动引起的实体水-虚拟水流动不侵占生态用水,保障自然-社会-经济的可持续性。

(3) 深化体制改革,助力实施最严格水资源管理制度。基于全产业链实体水-虚拟水统筹管理理念,我国农业水资源管理仍需进一步改进和完善。农业实体水管理方面,继续加大农业节水投入,将管理范畴扩展至广义水资源,同等重视供水管理与需水管理,提高全产业链各环节实体水利用效率。农业虚拟水管理方面,研究制定区域农业水足迹与虚拟水控制标准,通过控制标准实施粮食生产用水补偿奖惩制度、增收区域虚拟水贸易资源-经济补偿税等^[17]。与此同时,还需统筹考虑全产业链实体水-虚拟水耦合机制所产生的资源与经济效益,搭好供给侧结构性改革这一时代顺风车,以区域实体水消耗与虚拟水流动效率、效益最佳为目标优化区域种植结构,以实现区域水资源最优配置。最终,在区域农业水资源管理体系中,从全产业链视角,积极探索农业水价改革、水权转让制度改革,同步提高区域农业实体水资源与虚拟水流动管理水平,为全面贯彻最严格水资源管理制度,实现各阶段“三条红线”目标提供理论依据与技术支持。

参考文献

- 1 Wu P T, Gao X R, Zhao X N, et al. Framework of “two-dimension three-element” coupling flow of real water and virtual water (in Chinese). *Trans CSAE*, 2016, 32: 1–10 [吴普特, 高学睿, 赵西宁, 等. 实体水-虚拟水“二维三元”耦合流动理论基本框架. *农业工程学报*, 2016, 32: 1–10]
- 2 Savenije H H G, Van der Zaag P. Integrated water resources management: Concepts and issues. *Phys Chem Earth Parts A/B/C*, 2008, 33: 290–297
- 3 Falkenmark M. Meeting water requirements of an expanding world population. *Phil Trans Roy Soc Lond B*, 1997, 352: 929–936
- 4 Allan J A. Virtual water: A strategic resource global solutions to regional deficits. *Ground Water*, 1998, 36: 545–546
- 5 Hoekstra A Y. Virtual water trade: Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade. In: *Value of Water Research Report Series No. 12*, UNESCO-IHE, Delft, Netherlands, 2003
- 6 Savenije H H G, Hoekstra A Y, van der Zaag P. Evolving water science in the Anthropocene. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2014, 18: 319–332
- 7 Sivapalan M, Savenije H H G, Blöschl G. Socio-hydrology: A new science of people and water. *Hydrol Process*, 2012, 26: 1270–1276
- 8 Konar M, Evans T P, Levy M, et al. Water resources sustainability in a globalizing world: Who uses the water? *Hydrol Process*, 2016, 30: 3330–3336
- 9 Liu Y, Tian F Q. Comparison of water and land policies for agriculture water conservation in arid areas based on a coupled socio-hydrological model (in Chinese). *J Tsinghua Univ (Sci Technol)*, 2016, 56: 365–372 [刘烨, 田富强. 基于社会水文耦合模型的干旱区节水农业水土政策比较. *清华大学学报(自然科学版)*, 2016, 56: 365–372]
- 10 Wu P T, Zhao X N, Cao X C, et al. Status and thoughts of Chinese “agricultural north-to-south water diversion virtual engineering” (in Chinese). *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2010, 26: 1–6 [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. *农业工程学报*, 2010, 26: 1–6]
- 11 Zhang L, Xia J, Hu Z. Situation and problem analysis of water resource security in China. *Res Envir Yangtze Basin*, 2009, 18: 116–120
- 12 National Bureau of Statistics of China. *China Statistical Yearbook 1985–2013* (in Chinese). Beijing: China Statistics Press, 1986–2014 [中华人民共和国国家统计局. *中国统计年鉴1985–2013*. 北京: 中国统计出版社, 1986–2014]
- 13 Grafton R Q, Williams J, Perry C, et al. The paradox of irrigation efficiency. *Science*, 2018, 361: 6404
- 14 Song J F, Wang Y B, Wu P T. A reviews on irrigation water rebound effect (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2017, 28: 452–460 [宋建峰, 王玉宝, 吴普特. 灌溉用水反弹效应研究综述. *水科学进展*, 2017, 28: 452–460]
- 15 Song J, Guo Y, Wu P, et al. The agricultural water rebound effect in China. *Ecol Econom*, 2018, 146: 497–506
- 16 Zhuo L, Mekonnen M M, Hoekstra A Y. The effect of inter-annual variability of consumption, production, trade and climate on crop-related green and blue water footprints and inter-regional virtual water trade: A study for China (1978–2008). *Water Res*, 1978, 94: 73–85
- 17 Wu P T. Warning and strategy of North-to-South Water Transfer Project (in Chinese). *Adv Sci Technol Water Res*, 2015, 35: 121–124 [吴普特. “北水南调工程”的警示与应对策略. *水利水电科技进展*, 2015, 35: 121–124]
- 18 Cheng S K, Wang S Y. Food security strategy and food supply-side reform for new development phase (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 32: 1074–1082 [成升魁, 汪寿阳. 新时期粮食安全观与粮食供给侧改革. *中国科学院院刊*, 2017, 32: 1074–1082]
- 19 Li B G, Huang F. Defining the baselines for China agricultural water use in green and blue water approach (in Chinese). *Sci Agric Sin*, 2015, 48: 3493–3503 [李保国, 黄峰. 蓝水和绿水视角下划定“中国农业用水红线”探索. *中国农业科学*, 2015, 48: 3493–3503]
- 20 Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, et al. *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. London, UK: Earthscan, 2011
- 21 Zhuo L, Mekonnen M M, Hoekstra A Y, et al. Inter- and intra-annual variation of water footprint of crops and blue water scarcity in the Yellow River basin (1961–2009). *Adv Water Resour*, 2016, 87: 29–41
- 22 Wu P T, Sun S K, Wang Y B, et al. Research on the quantification methods for water footprint of crop production (in Chinese). *J Hydr Eng*, 2017, 48: 651–660 [吴普特, 孙世坤, 王玉宝, 等. 作物生产水足迹量化方法与评价研究. *水利学报*, 2017, 48: 651–660]
- 23 Schyns J F, Hoekstra A Y. The added value of water footprint assessment for national water policy: A case study for Morocco. *PLoS One*, 2014, 9: e99705
- 24 Tuninetti M, Tamea S, Laio F, et al. A fast track approach to deal with the temporal dimension of crop water footprint. *Environ Res Lett*, 2017, 12: 074010
- 25 Duarte R, Pinilla V, Serrano A. Understanding agricultural virtual water flows in the world from an economic perspective: A long term study. *Ecol Indicators*, 2016, 61: 980–990
- 26 Konar M, Dalin C, Hanasaki N, et al. Temporal dynamics of blue and green virtual water trade networks. *Water Resour Res*, 2012, 48: W07509
- 27 Zhao X, Liu J, Liu Q, et al. Physical and virtual water transfers for regional water stress alleviation in China. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112: 1031–1035
- 28 Guan D, Hubacek K. Assessment of regional trade and virtual water flows in China. *Ecol Econom*, 2007, 61: 159–170

- 29 Ma J, Wang D X, Hoekstra A Y, et al. Application of the virtual water trade to China's grain security (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2006, 17: 102–107 [马静, 汪党献, Hoekstra A Y, 等. 虚拟水贸易在我国粮食安全问题中的应用. *水科学进展*, 2006, 17: 102–107]
- 30 Dalin C, Hanasaki N, Qiu H, et al. Water resources transfers through Chinese interprovincial and foreign food trade. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2014, 111: 9774–9779
- 31 Sun S K, Wang Y B, Wu P T, et al. Spatial variability and attribution analysis of water footprint of wheat in China (in Chinese). *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2015, 31: 142–148 [孙世坤, 王玉宝, 吴普特, 等. 小麦生产水足迹区域差异及归因分析. *农业工程学报*, 2015, 31: 142–148]
- 32 Zhong H P, Geng L H. Virtual water and water security (in Chinese). *China Water Res*, 2004, 5: 22–23 [钟华平, 耿雷华. 虚拟水与水安全. *中国水利*, 2004, 5: 22–23]
- 33 Cheng G D. Virtual water—A strategic instrument to achieve water security (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2003, 4: 260–265 [程国栋. 虚拟水——中国水资源安全战略的新思路. *中国科学院院刊*, 2003, 4: 260–265]
- 34 Chapagain A K, Hoekstra A Y, Savenije H H G. Water saving through international trade of agricultural products. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2006, 10: 455–468

Summary for “区域主要作物生产实体水-虚拟水耦合流动过程解析与评价”

Assessment of regional crop-related physical-virtual water coupling flows

Pute Wu^{1,2,4,5*}, La Zhuo^{1,2,4,5}, Yilin Liu³, Xuerui Gao^{1,2,4,5}, Yubao Wang^{2,3}, Xining Zhao^{1,2,4,5} & Shikun Sun^{2,3}¹ Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;² Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;³ College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;⁴ National Engineering Research Centre for Water Saving Irrigation at Yangling, Yangling 712100, China;⁵ Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China* Corresponding author, E-mail: gjzwpt@vip.sina.com

Agriculture is the sector with the largest water usage globally, as well as within China. Water is a limited resource that represents the base for regional food security. Modern water science has revealed that crop production consumes not only so-called blue water (surface and ground water), which is at the core of current agricultural water policies, but also so-called green water (rainwater). As driven by natural-socio-economic (“ternary”) activities, water related to the crop production chain (i.e. pre-, during- and after-production) flows in coupled physical and virtual (the “two-dimension”) forms through physical water consumption, virtual water embedding and inter-regional virtual water flows. In this work, based on a physical-virtual water flow theory framework, we have developed a quantification approach for regional crop-related physical-virtual water flow processes, with a focus on the water quantity. This quantification integrates green and blue water footprint accounting and virtual water flow network simulations. We applied this approach in a case study for six western provinces along the “Silk Road Economic Belt” in China over the period 1985–2013. Ten major crops were considered in the case study. Our results show significant crop-related physical-virtual water flows among the six provinces. In terms of blue water, 49% of the irrigation water supply was consumed in the crop production we considered, 31% of which was converted to virtual water flows. Moreover, we find that a trade-off exists between water use efficiency and associated economic value along the physical-virtual water flows. For example, Xinjiang has suffered water stress due to crop production, with a net virtual water export of $21 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$, but has a high economic income of 314 million CNY/a as a result of the water flow. This study highlights the importance and necessity of improving traditional agricultural water management, which focuses on reducing blue water consumption through engineering strategies, by integrating physical-virtual water flow assessments in order to achieve both high resources and economic efficiencies in water use, as well as both green and blue water savings. Specifically, we propose three key steps towards attaining this goal: (1) To consider both the physical and virtual water flows in modern agriculture water saving technologies as well as policies; (2) to invest in and enhance academic capabilities for quantifying, analysing and optimizing agricultural physical-virtual water flows; (3) to build a modern agricultural water management system targeted towards healthy and sustainable physical-virtual water flows in order to finally achieve both water sustainability and food security goals.

physical-virtual water flow, two-dimensional water flow in ternary systems, crop production, water footprint, six western provinces

doi: [10.1360/N972018-00997](https://doi.org/10.1360/N972018-00997)