2020年9月

SHUILI XUEBAO

第51卷 第9期

文章编号:0559-9350(2020)09-1059-11

黄河流域作物生产与消费实体水-虚拟水耦合流动 时空演变与驱动力分析

卓 拉1,3,4,5, 栗 萌2,3, 吴普特1,3,4,5, 黄红荣2,3, 刘艺琳2,3

- (1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;
- 2. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;
- 3. 西北农林科技大学 旱区节水农业研究院,陕西 杨凌 712100;
- 4. 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心,陕西 杨凌 712100;
- 5. 中国科学院 水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:愈加有限的水资源是黄河流域生态保护和高质量发展面临的最主要矛盾和瓶颈。在部门用水竞争持续加剧的同时,内嵌在农产品中的虚拟水流动现象日趋频繁。本文以作物生产水足迹和虚拟水流动为表征参数,量化2000—2014年间黄河流域主要作物实体水-虚拟水耦合流动关键过程及其时空演变;从人口、社会经济、农业发展和居民消费4方面,运用扩展STIRPAT模型辨识其关键社会经济驱动因子。结果显示:黄河流域作物单产水平增加有效降低了作物单产水足迹,有效控制了作物生产总水足迹规模;随小麦、玉米和苹果等作物输出,流域作物虚拟水流动规模显著增加,2014年流域虚拟水总输出量占流域作物生产耗水的41%;人口和人均GDP对作物生产水足迹和虚拟水进出口量均起促进作用。

关键词: 水足迹; 虚拟水; 耦合流动; 驱动力; 作物; 黄河流域

中图分类号: TV211

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20200336

1 研究背景

面向黄河流域生态保护和高质量发展国家战略^[1],"水少"仍是黄河流域新时期可持续水资源管理最主要的矛盾和瓶颈^[2-4]。黄河流域以仅占全国 2%的水资源量承担着全国 13%的粮食生产^[5]。农业一直是黄河流域第一大用水户,灌溉取水量占总取水量的 63%(2018年)^[6]。社会经济高度发展和城镇化水平加快,各部门用水竞争加剧,流域农业水资源可持续管理面临巨大挑战和不确定性。开放经济社会中,内嵌在贸易和商品流通中的虚拟水流动现象日趋频繁^[7]。从全产业链视角,由作物产前种植结构与水资源配置、产中实体水消耗,及产后消费贸易牵引形成的虚拟水流动,都决定着区域的农业水资源利用效率^[8]。自然-经济-社会(三元)因素驱动下,农业水资源消耗形成实体水-虚拟水(二维)嵌入转化、互为反馈、相互影响的实体水-虚拟水耦合流动客观现象^[9]。显然,重视实体水供水工程节水及产中节水的传统农业水资源管理制度已经无法完全解决现代农业水问题。水资源管理,特别是农业水资源的科学管理应实体水-虚拟水统筹考虑。

具体而言,实体水-虚拟水耦合流动过程包括三个层次^[9](图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

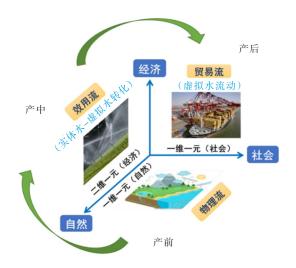
收稿日期: 2020-05-14; 网络首发时间: 2020-09-08

网络首发地址: http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20200904.1639.004.html

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFF0215702); 国家自然科学基金项目(51809215); 中国科学院西部青年学者项目(B类)

作者简介:卓拉(1988-),研究员,主要从事区域农业高效用水研究。E-mail: zhuola@nwafu.edu.cn

通讯作者:吴普特(1963-),教授,主要从事区域农业高效用水研究。E-mail: gjzwpt@vip.sina.com



(注:图中"一维一元 (自然)"指实体水(一维)在 自然系统(一元)中的循环; "二维一元(经济)"指实体 水-虚拟水(二维)在经济系统(一元)中的转化;"一维 一元(社会)"指虚拟水(一 维)在社会系统(一元)中的 流动。)

图 1 实体水-虚拟水耦合流动概念性示意[8]

源配置规律,形成以"实体水摄取-实体水消耗-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)"的虚拟水流动路径,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"。图1中,自然、经济、社会三个坐标轴分别表示自然系统、经济系统和社会系统。虽然在坐标方向的移动不代表特定物理过程,但是两两坐标之间形成的面表示两两系统相互作用所形成的复杂场。这里的经济主要指生产、贸易和消费等经济行为本身;社会系统的要素是个人、人群和组织,这里即指完成上述经济行为的各级人群。因此,实体水-虚拟水耦合流动过程量化的核心是对三层次中关键环节的定量表征。作物消耗型生产水足迹^[10]包括蓝水足迹和绿水足迹,分别指作物生产对灌溉水和降水的实际消耗量,有效表达了由蓝水与绿水相互制约与影响而形成的现代农业耗水连续谱系^[7,11],是作物生产与消费实体水-虚拟水耦合流动物理流和效用流的有效特征参数。

可见,作物生产水足迹与虚拟水流动的量化与驱动力分析是实现实体水-虚拟水统筹配置和优化目标的重要基础,已成为国内外研究热点。Mekonnen等[12]运用动态土壤水分模型对全球1996—2005年126种作物生产水足迹进行量化评价;郭相平等[13]分析了中国各省农作物生产水足迹时空演变规律,表明粮食和水果类作物对中国农作物水足迹变化起关键作用;Zhuo等[14]通过AquaCrop模型对黄河流域长时间序列作物生产水足迹量化分析,发现黄河流域遭受严重的蓝水资源短缺;卓拉等[15]考虑不同灌溉方式对黄河流域小麦生产水足迹进行量化分析,指出供水与灌溉方式对作物生产水足迹的重要性。在虚拟水流动量化方面,Dalin等[16]量化了全球粮食贸易中蕴含的地下水消耗量,为提高全球粮食生产和地下水资源可持续性提供科学依据;吴普特等[8]对中国西部六省实体水-虚拟水耦合流动过程进行解析与评价,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;Feng等[17]基于投入产出模型对黄河流域虚拟水流动进行量化,建议减少蓝水虚拟水出口从而生产价值更高的产品。Wang等[18]发现人口和人均GDP分别是影响国家水资源消耗和虚拟水进口最主要的驱动因素;张凡凡等[19]对中国 2006—2015年水足迹进行测算,指出人口是中国水足迹强度的主要驱动因子。然而,以往研究中对作物生产水足迹及区域间虚拟水流动的时空分布和驱动力分析仍相对独立,缺乏对于作物生产与消费实体水-虚拟水耦合流动整体过程演变特征及驱动机制的综合解析。

本文基于实体水-虚拟水"二维三元"耦合流动集成量化方法框架^[8],对黄河流域2000—2014年16种主要作物(小麦、玉米、谷子、稻谷、高粱、大麦、花生、大豆、油菜籽、葵花籽、甘蔗、棉花、马铃薯、西红柿、苹果和葡萄)生产和消费实体水-虚拟水耦合流动关键过程进行逐年量化,解析其在流域内的时空演变特征和规律;采用可扩展的随机性环境影响评估模型(扩展STIRPAT模型),考虑人口、经济发展、农业技术水平和居民消费水平4方面共9个驱动因子,厘清流域主要作物实体

水-虚拟水耦合流动过程的社会经济驱动机制。研究结果以期为协调流域内人类经济社会用水与自然环境生态用水关系,实现供需两侧可持续水资源管理提供科学依据与参考。

2 研究方法与数据来源

2.1 作物生产水足迹量化方法 作物单位产量生产蓝、绿水足迹等于单位产量作物生长期蓝、绿水腾发量。本研究以5弧分栅格为空间计算单元,应用联合国粮食及农业组织(FAO)开发的作物水分生产力模型AquaCrop^[20-22],区分灌溉和雨养条件,计算作物生长期每日蓝、绿水腾发量及作物单产,以省尺度作物单产统计数据分别对各省所属栅格点综合加权单产水平进行校核,推导出各作物逐年生产水足迹。AquaCrop通过追踪根区水分流入量和流出量来模拟土壤水分动态平衡:

$$S_{[t]} = S_{[t-1]} + PR_{[t]} + IRR_{[t]} + CR_{[t]} - ET_{[t]} - RO_{[t]} - DP_{[t]}$$

$$\tag{1}$$

式中: $S_{[\iota]}$ 为生长期中第 ι 天土壤含水量,mm; $S_{[\iota-1]}$ 为生长期中第 ι -1天土壤含水量,mm; $PR_{[\iota]}$ 为第 ι 天降水量,mm; $IRR_{[\iota]}$ 为第 ι 天灌溉量,mm; $CR_{[\iota]}$ 为地下水毛细上升量,mm; $ET_{[\iota]}$ 为第 ι 天作物腾发量,mm; $RO_{[\iota]}$ 为第 ι 天地表径流量,mm; $DP_{[\iota]}$ 为第 ι 天深层渗透量,mm。需要说明,因空间计算单元较大,本研究未考虑土壤水的横向流动和壤中流,建议在针对特定农田及更小尺度的核算中加以考虑。

作物播种初始土壤含水设为绿水,作物生长期中灌溉与降水分别是蓝水足迹与绿水足迹来源。通过追踪每日降水量和灌溉用水量对土壤水分平衡各要素的占比,可将作物每日腾发量分为蓝水和绿水^[14,23]:

$$\begin{cases} S_{g[\iota]} = S_{g[\iota-1]} + \left(PR_{[\iota]} + IRR_{[\iota]} - RO_{[\iota]}\right) \times \frac{PR_{[\iota]}}{\left(PR_{[\iota]} + IRR_{[\iota]}\right)} - \left(DP_{[\iota]} + ET_{[\iota]}\right) \times \frac{S_{g[\iota-1]}}{S_{[\iota-1]}} \\ S_{b[\iota]} = S_{b[\iota-1]} + \left(PR_{[\iota]} + IRR_{[\iota]} - RO_{[\iota]}\right) \times \frac{IRR_{[\iota]}}{\left(PR_{[\iota]} + IRR_{[\iota]}\right)} - \left(DP_{[\iota]} + ET_{[\iota]}\right) \times \frac{S_{b[\iota-1]}}{S_{[\iota-1]}} \end{cases}$$

$$(2)$$

式中: $S_{g[t]}$ 和 $S_{b[t]}$ 为第 t天土壤中的绿水量和蓝水量,mm; $S_{g[t-1]}$ 和 $S_{b[t-1]}$ 为第 t-1 天土壤中的绿水量和蓝水量,mm; $S_{[t-1]}$ 为第 t-1 天土壤中的总含水量。

对于雨养作物,仅涉及绿水足迹。对于灌溉作物,本文考虑了3种不同的灌溉技术^[15,24]:传统地面灌、喷灌和微灌,通过设置不同的表层土壤湿润率(分别为80%、100%和40%),分别建立Aqua Crop标准化输入文件,采用加权平均得到不同灌溉方式下各栅格点的作物单产水足迹。

$$WF_{b} = \frac{\sum_{i=1}^{3} \left(10 \times \sum_{i=1}^{gp} ET_{b,i[i]} \times w_{i}\right)}{\sum_{i=1}^{3} (Y_{i} \times w_{i})}$$
(3)

$$WF_{g} = \frac{\sum_{i=1}^{3} \left(10 \times \sum_{i=1}^{gp} ET_{g,i[i]} \times w_{i} \right)}{\sum_{i=1}^{3} (Y_{i} \times w_{i})}$$
(4)

式中:i为不同灌溉方式; WF_b 和 WF_g 分别为作物单产蓝水足迹和绿水足迹, \mathbf{m}^3/\mathbf{t} ; $ET_{b,i[\iota]}$ 和 $ET_{g,i[\iota]}$ 分别为i灌溉方式下第 ι 天的蓝、绿水腾发量, $\mathbf{m}\mathbf{m}$; Y_i 为i灌溉方式下的作物单产, $\mathbf{t}/\mathbf{h}\mathbf{m}^2$; w_i 为i灌溉方式下的灌溉面积占比,该栅格占比与其所在省份各灌溉方式下灌溉面积占全省有效灌溉面积的比例一致。本文结果分析中的作物生产水足迹,即指综合考虑灌溉和雨养条件的各作物加权生产水足迹。

2.2 流域内省际间作物虚拟水流动量化 作物虚拟水流动量即作物单位生产水足迹与作物贸易量的

$$VWT_{i,i,x} = WF_{i,x}T_{i,i,x} \tag{5}$$

式中: $VWT_{i,j,x}$ 为i向j地运输作物x伴生虚拟水流动量, m^3/a ; $WF_{i,x}$ 为i地生产作物x单位产量水足迹, m^3/t ; $T_{i,j,x}$ 为i向j地作物x运输量,t/a。本研究中包含国际和国内两部分作物贸易运输量。

本文采用最低运输成本法^[8,25]量化作物贸易量,以运输成本最低为优化目标,各省每年各作物供需平衡为约束条件,利用线性规划量化中国省际间作物贸易量和国际贸易量(考虑天津、青岛、大连、上海、厦门、广州、深圳和宁波八个港口)。根据各省在流域内人口分布占比^[26]降尺度到黄河流域内各省作物贸易量。成本数据是基于京津冀道路网络数据集(铁路、公路和主要港口水运航线),运用ArcGIS网络分析工具,获得单位成本矩阵^[27]。作物供需约束数据由各省产量和消费量数据差值表示。因可获数据极其有限,本研究未考虑人均消费的空间差异性。线性优化模型如下:

$$\begin{cases} \min \left(C = \sum_{i=1,j=1}^{i=31,j=31} T_{i,j} \times c_{i,j} \right) \\ \sum_{j=1}^{j=31} T_{i,j} \leq S_i & i = 1, \dots, 31 \\ \sum_{i=1}^{i=31} T_{i,j} = D_j & j = 1, \dots, 31 \\ T_{i,j} \geq 0 \end{cases}$$
(6)

式中:C为运输总成本,元; $T_{i,j}$ 为从i到j省作物贸易量,t/a; $c_{i,j}$ 为从i到j省作物单位运输成本,元/t; S_i 为i省作物可流出量,t/a; D_j 为j省作物需流入量,t/a。

2.3 扩展 STIRPAT 模型 STIRPAT 模型是 York 等人 $^{[28]}$ 由 IPAT 等式演变为的随机回归影响模型,该模型常用于分析人口(P)、富裕度(A)和技术水平(T)对环境压力(I)的影响,也广泛应用于水足迹领域 $^{[18,29-31]}$,公式如下:

$$I_i = aP_i^b A_i^c T_i^d e_i (7)$$

式中:a为模型系数;b、c、d为各因素指数;e为模型误差。下标i表示不同观测单元的不同模型参数。当a=b=c=d=e=1时,SITRPAT模型即为IPAT恒等式。通常将公式(7)转为对数形式:

$$\ln I_i = a + b \left(\ln P_i \right) + c \left(\ln A_i \right) + d \left(\ln T_i \right) + e \tag{8}$$

式中: $a \times e$ 分别为式(7)中的 $\ln(a)$ 和 $\ln(e)$ 。在对数形式中驱动力的各系数表示为: 如果其它的影响因素维持不变时,驱动力影响因素每变化1%所引起环境影响变化的百分比。

扩展 STIRPAT模型可基于上述模型增加其他驱动因子,因此本研究选取四大类指标,包括人口指标(P),经济发展指标(A),农业技术水平指标(T)和居民消费水平指标(C),共 9个驱动因子构建扩展 SITRPAT模型(见表 1)。以作物生产总水足迹(WF)为例,构建的扩展 STIRPAT模型如下:

$$\ln WF_i = a + b\left(\ln P_i\right) + c\left(\ln A_i\right) + d\left(\ln T_i\right) + f\left(\ln C_i\right) + e \tag{9}$$

式中: $\ln WF_i$ 为因变量; $\ln P_i$ 、 $\ln A_i$ 、 $\ln T_i$ 、 $\ln C_i$ 为自变量; a 为常数项; b 、 c 、 d 、 f 为回归系数; e 为误差项。

使用方差膨胀因子对各驱动因子进行共线性诊断^[32],若方差膨胀因子≤10则证明各因子间无共线性,如表1所示,本研究中各驱动因子间不存在明显的共线性。

2.4 数据来源 全国各省人口,作物产量,播种面积数据以及与黄河流域有关的各省国民生产总值,第一产业增加值,第三产业增加值,农业机械总动力量和人均可支配收入均来自国家统计局国家数据网^[33];黄河流域 2.5 弧分栅格单元分辨率人口分布来自 NASA 社会经济数据和应用中心(SE-DAC)^[26];黄河流域内省级各作物有效灌溉面积和各灌溉方式灌溉面积等农业生产数据来源于《中国农业机械工业年鉴》^[34];各作物栅格尺度灌溉面积和雨养面积分布比例取自 MIRCA 2000 数据库^[35];月平均降雨量、日平均最高温度和日平均最低温度等 AquaCrop模型所需气象数据源于 CRU-TS v4.03 数

驱动因子 指标属性 单位 容差 方差膨胀因子 人口指标 人口 万人 0.307 3.261 人均 GDP 元/人 0.156 6.398 经济发展指标 第一产业 GDP 占比 % 0.195 5.131 第三产业 GDP 占比 0.323 3.097 人均耕地面积 hm²/人 0.262 3.819 农业技术水平指标 灌溉面积占比 % 0.201 4.978 人均农业机械总动力 kW/人 0.118 8.505 平均食物自给率 % 0.292 3.43 居民消费水平指标 0.239 4.183 食物消费能力 t/元

表1 驱动因子及共线性统计量

注: 平均食物自给率等于消费量与进口量之差除以消费量。

据库^[36]; 黄河流域土壤类型和含水量数据来自 ISRIC 土壤地形数据库^[37]; 各作物国际贸易数据,消费量数据来自联合国粮食及农业组织数据库(FAOSTAT)^[38],消费量数据通过 Ma等^[39]提出方法分配到各省; 地图数据来自中国科学院资源环境科学数据中心^[40]。

3 结果分析

3.1 黄河流域作物生产总水足迹——物理流 2000—2014年黄河流域作物生产总水足迹从595亿 m³/a (蓝水足迹占35%)微增至605亿 m³/a(蓝水足迹占32%),仅增长2%,而作物产量增长54%。图2展示了2014年黄河流域作物生产总水足迹及蓝水足迹占比的空间分布状况,作物生产总水足迹高值区聚集在中下游地区的山东,河南和陕西等省份。作为农业生产大省,三省在流域内作物产量占黄河流域整体的49%,农业耗水量较高。在黄河流域内,作物生产蓝水足迹占比高值区与大型灌区的分布密不可分,如上游的河套灌区、中游的伊洛沁河和汾渭盆地灌区以及下游的黄淮海引黄灌区等。气候因素使黄河流域整体蓝水足迹占比处于较高水平,因上中游降雨量较少,故所需灌溉水量较大;下游因腾发量较高也需要较多的灌溉量[15]。2000—2014年甘肃省作物生产总水足迹增长最多为15%,主要由葡萄作物生产总水足迹的增长(610%)所致;宁夏回族自治区作物生产总水足迹下降最多为9%,主要由大麦和大豆作物生产水足迹下降所致(10%和7%)。

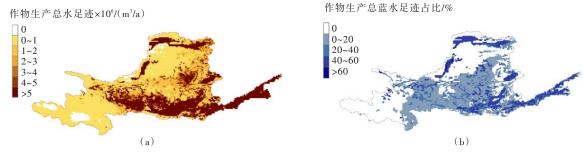


图 2 2014年黄河流域作物生产总水足迹及蓝水足迹占比空间分布

如图 3 所示,2000—2014年作物生产总水足迹占比前三作物为小麦、玉米和苹果,但小麦占比逐渐下降(由41%下降为35%),玉米和苹果占比上升(分别由23%和7%上升至30%和8%),这与作物种植结构变化密切相关,2000—2014年小麦种植面积下降18%,玉米和苹果种植面积分别上升71%和40%。各作物间大麦作物生产总水足迹下降最多(47%),葡萄作物生产总水足迹上升最多(334%),大麦和葡萄同时也是作物播种面积下降和增长最多的作物,2014年大麦和葡萄播种面积分别是2000年的0.5和4倍。

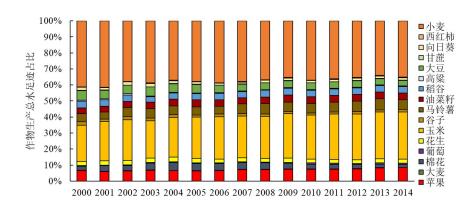


图 3 2000-2014年黄河流域各作物生产总水足迹占比演变

3.2 黄河流域作物单位产量水足迹——效用流 随着农业技术水平发展,作物单产水平普遍提高,黄河流域作物单位生产水足迹大体呈下降趋势。表 2 列出了各作物 2000 和 2014 年各作物单产水足迹,可以看出,苹果作物单产水足迹下降速率最大(43%); 2000—2014 年间单产水足迹最高的作物由油菜籽变为大豆;甘蔗是单产蓝水足迹占比最高的作物,但蓝水足迹占比由 61%下降为 58%。图 4 进一步展示了作物单产水足迹与作物单产水平呈显著反比关系。

表 2	出ってかれ	L+ K+ 1k	- IIIm 24	マナナル	□ \± 1.0	24 -14	□ →
70	由 701 7分 1	w 🌭 // i	: #/// IPI		72 7/10 不日	₩ 7K	正 7///

(单位: m³/t)

1 for the form	20	000	2014		
作物	作物单产蓝水足迹	作物单产总水足迹	作物单产蓝水足迹	作物单产总水足迹	
苹果	133	592	54	338	
大麦	17	316	25	215	
棉花	774	1995	838	1940	
葡萄	0	612	0	479	
花生	284	1307	317	1263	
玉米	237	927	141	596	
谷子	186	2109	172	1724	
马铃薯	9	202	8	193	
油菜籽	1194	3475	691	2478	
稻谷	408	856	399	767	
高粱	224	1216	300	1420	
大豆	594	3103	771	3129	
甘蔗	193	315	245	424	
葵花籽	164	2248	126	1397	
西红柿	43	104	15	66	
小麦	737	1469	542	1087	

黄河流域典型作物单位生产水足迹空间分布如图 5 所示,2000—2014间均有下降趋势。黄河流域内作物单产水足迹空间差异明显。作物单产水足迹高值区分布与当地气候条件及农业生产水平等因素有关,内蒙古自治区降雨量少而作物腾发量高,导致作物单产水足迹较高。下游河南、山东等省作为农业生产大省,农业生产水平较高,故作物单产水足迹较低。例如,2014年小麦作物单产水足迹内蒙古自治区最高为2240 m³/t,河南省最低为872 m³/t。

3.3 黄河流域内省际间作物虚拟水流动——贸易流 2000—2014年间黄河流域作物虚拟水净进口量由-8.4亿 m³/a变为234.4亿 m³/a,其中国际虚拟水净进口量由-10.5亿 m³/a变为187.8亿 m³/a,主要是由于大豆进口量的增加(2014年是2000年的12.4倍)以及玉米出口量的减少(2014年是2000年的0.02倍)造成的。黄河流域国内虚拟水出口主要由小麦、玉米和苹果造成;该三类作物多年平均产量占黄

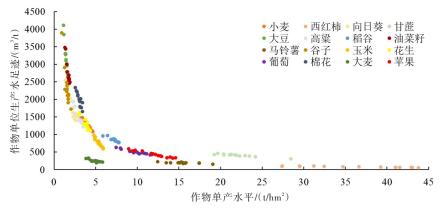


图 4 黄河流域作物单位生产水足迹与作物单产水平关系

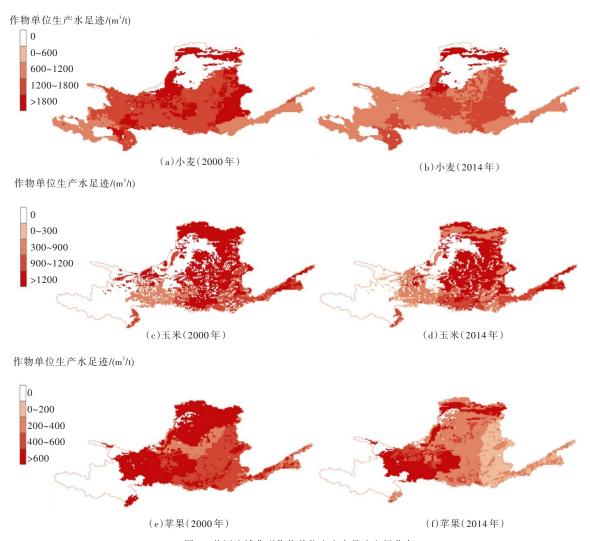


图 5 黄河流域典型作物单位生产水足迹空间分布

河流域作物总产量的62%。国内虚拟水进口主要由稻谷引起,由于黄河流域3/4的面积处于干旱半干旱地区,不适合种植稻谷,2000—2014年稻谷平均播种面积仅占所有作物播种面积的3%,依靠从江苏、湖南等省份进口满足流域内居民稻谷消费需求。

黄河流域内省际间作物虚拟水流动格局如图7所示。2000年黄河流域有5个省份为虚拟水出口地区,其中山东省为最大的虚拟水流出省份(28亿 m³/a),主要由小麦出口造成。2000年山东省小麦虚

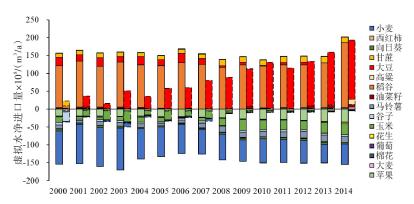


图 6 2000-2014年黄河流域作物国内(左)和国际(右)虚拟水流动量

拟水出口量占其总出口量的93%。2014年所有省份均为虚拟水进口地区,甘肃省为最大的虚拟水进口省(48亿 m³/a),稻谷和大豆分别占50%和33%。2000—2014年流域内各省虚拟水流动频率增强,2000年流域内最大的省际间虚拟水流动从陕西省流向四川省,其中玉米和小麦伴生虚拟水流动分别占60%和21%。2014年最大的虚拟水流动发生在山西到四川,玉米伴生虚拟水占94%。

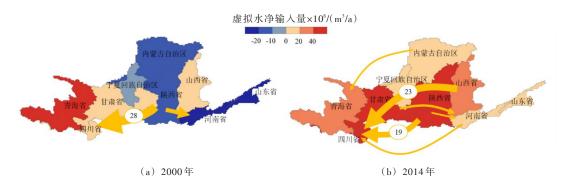


图 7 黄河流域 2000 和 2014 年作物虚拟水流动格局

3.4 黄河流域作物实体水-虚拟水耦合流动驱动机制 黄河流域实体水-虚拟水驱动力分析结果显示:人口和人均耕地面积是作物生产总水足迹的主要正向驱动因子(表3)。人口和人均耕地面积分别通过消费和生产规模刺激农业生产,从而促进作物生产总水足迹的增加。人均GDP和灌溉面积占比也对作物生产总水足迹起促进作用。黄河流域播种面积增长速度大于灌溉面积,导致灌溉面积占比略有下降^[33],引起水足迹增长。可通过推广节水灌溉技术、加大现代化灌溉设备投入等措施降低农业用水量。第三产业GDP占比是作物生产总水足迹最大的抑制因子,其次是第一产业GDP占比。第一产业

GDP占比反应了农业技术水平的发展水平,说明 黄河流域的农业技术水平在大幅的提高,从而使 单位作物耗水量大幅下降,甚至超过了产量增加 所带来的农业耗水量,最终导致第一产业 GDP 占比增加 1%,作物生产总水足迹下降 0.35%, 这与国家实施的西部大开发、中部崛起等战略密 不可分。人均农业机械总动力量、平均食物自给 率和食物消费能力起较弱抑制作用。

人口、食物消费能力和人均 GDP 对虚拟水进口量起促进作用。与作物生产总水足迹相同,人口通过刺激消费促进虚拟水进口量,人口增长会扩大黄河流域对外部水资源的依赖程度。平均食物自给率是最大的抑制因子。黄河流域平均食

表 3 黄河流域实体水-虚拟水耦合流动扩展 STIRPAT模型回归结果

驱动因子	作物生产	作物虚拟水	作物虚拟
2000年	总水足迹	进口量	水出口量
人口	0.989	0.369	1.042
人均GDP	0.04	0.04	0.322
第一产业 GDP 占比	-0.351	-0.995	1.848
第三产业 GDP 占比	-1.316	-0.693	-1.996
人均耕地面积	1.069	-0.02	0.346
灌溉面积占比	0.164	-0.81	1.211
人均农业机械总动力	-0.096	-1.177	-0.029
平均食物自给率	-0.088	-3.688	3.278
食物消费能力	-0.328	0.113	-0.295

物自给率在研究时段由98%下降至91%,虚拟水进口量随之增长95%。人均农业机械总动力量代表农业基础设施的发展水平,黄河流域2014年人均农业机械总动力量约为2000年的2倍,农业基础设施发展迅速,促进农业现代化的发展,结果显示农业基础设施发展对虚拟水进口量起较大的抑制作用。与作物生产总水足迹相同,第一产业GDP占比与第三产业GDP占比对虚拟水进口量呈抑制作用。灌溉面积占比也起抑制作用,说明黄河流域已实施的节水措施效果显著,应大力推广。其他因子起较弱抑制作用。

对作物虚拟水出口量来说,除第三产业GDP占比、食物消费能力和人均农业机械总动力外其他因子均起促进作用。与虚拟水进口量相反,平均食物自给率是最大的促进因子,由于平均食物自给率下降,黄河流域2000—2014年虚拟水出口量减少3%。第一产业GDP占比和灌溉面积占比均反映了农业生产水平的发展,对虚拟水出口量均起促进作用。人口作为生产力和消费力的统一,对三种应变量均起促进作用,应优化人口结构和产业结构,控制城镇化进程,在保障粮食安全的前提下使社会稳步发展。人均GDP和人均耕地面积在增加当地农业耗水量的同时也驱动虚拟水进出口量增多。

4 结论与讨论

本文以作物生产水足迹与省际间虚拟水流动为表征参数,量化并解析 2000—2014年黄河流域作物生产与消费实体水-虚拟水耦合流动时空演变特征;从人口、社会经济、农业发展和居民消费 4方面,辨析流域作物生产与消费实体水-虚拟水耦合流动过程的主要社会经济驱动因子。在作物生产实体水消耗环节,结果显示黄河流域农业生产水平提高,作物单位面积产量增加,可有效降低作物单位生产水足迹,有助于在满足增产需求的前提下控制作物生产总水足迹;与此同时,黄河流域作物虚拟水流动现象日益凸显,随小麦、玉米和苹果等作物产品输出,流域虚拟水总输出量在 2014年已达流域作物生产耗水的 41%,流域内省际间虚拟水流动也日趋明显。稻谷与大豆进口使黄河流域整体为虚拟水净进口区。驱动力分析结果发现人口和人均 GDP对作物生产水足迹和虚拟水进出口量均起促进作用,第三产业 GDP 占比则起抑制作用,平均食物自给率分别是虚拟水进出口的关键负向和正向驱动因子。

在黄河流域可供水资源量极其有限的前提下,保障流域生态与社会经济可持续发展,注重水资源供需两侧均衡协同的实体水-虚拟水统筹评价与管理迫在眉睫。对于种植业这一流域用水大户,"以水定产,量水而行"^[1]的科学内涵不仅应包含以水资源承载力为上限的种植结构优化和以工程节水、农艺节水和生物节水为主要抓手的产中节水措施,也应重视产后的虚拟水流动调控与管理。管理节水的内涵和外延可由此拓展。一方面,黄河流域农业生产水平提高对农业水资源效率提高作用显著,仍存在水足迹空间差异大等问题,可通过节水技术推广等措施,同时设置水足迹基准,在保证产能不变或有所提高的前提下,控制农业耗水总量;另一方面,黄河流域虚拟水出口主要由市场价值差异较大的小麦、玉米和苹果输出造成。并且流域内省际间虚拟水流动日益频繁,规模不断扩大,使水资源紧缺但农业生产任务较重的地区生态和生产压力加剧。这再一次证明实体水消耗和虚拟水流动相互耦合,提高虚拟水输出地区的农业生产效率,加强对富水地区或水生产力相对较高地区的虚拟水进口,均可对缓解区域水资源压力起正向作用。建议从全产业链视角下,统筹实体水-虚拟水,进行农业生产与水资源规划,系统评估作物生产与经济发展之间的关系,优化人口、膳食和产业结构,适当建立农业生产虚拟水补偿制度,在保障虚拟水输入地区粮食安全和水资源安全的基础上,最大化虚拟水输出地区的生态和经济效益,实现虚拟水输出地区水资源可持续高效利用。

参考文献:

- [1] 习近平.在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话[J].求是,2019(20):4-11.
- [2] 王浩, 赵勇. 新时期治黄方略初探[J]. 水利学报, 2019, 50(11):1291-1298.
- [3] 胡春宏, 张晓明. 论黄河水沙变化趋势预测研究的若干问题[J]. 水利学报, 2018, 49(9):1028-1039.
- [4] 贾绍凤,梁媛.新形势下黄河流域水资源配置战略调整研究[J].资源科学,2020,42(1);29-36.

- [5] 水利部黄河水利委员会.黄河流域综合规划2012-2030年[M].郑州:黄河水利出版社,2013.
- [6] 水利部黄河水利委员会.黄河水资源公报 2018 [M].郑州:黄河水利出版社,2019.
- [7] D'ODORICO P, CARR J, DALIN C, et al. Global virtual water trade and the hydrological cycle: patterns, drivers, and socio-environmental impacts[J]. Environmental Research Letters, 2019, 14: 053001.
- [8] 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[J]. 科学通报, 2019, 64(18):1953-1966.
- [9] 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[J].农业工程学报, 2016,32(12):1-10.
- [10] HOEKSTRA A Y . Virtual water trade: Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade[R]// Value of Water Research Report Series No . 12 . UNESCO-IHE, Delft, Netherlands, 2003 .
- [11] 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[J].中国农业科学,2015,48:3493-3503.
- [12] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15: 1577-1600.
- [13] 郭相平,高爽,吴梦洋,等.中国农作物水足迹时空分布与影响因素分析[J].农业机械学报,2018,49 (5):295-302.
- [14] 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) [J]. Advances in Water Resources, 2016, 87: 29-41.
- [15] 卓拉,王伟,冯变变,等.黄河流域小麦生产水足迹量化与评价[J].农业机械学报,2019,50(9): 264-271.
- [16] DALIN C, WADA Y, KASTNER T, et al. Groundwater depletion embedded in international food trade[J]. Nature, 2017, 543: 700-704.
- [17] FENG K S, SIU Y L, GUAN D, et al. Assessing regional virtual water flows and water footprints in the Yellow River Basin, China: A consumption based approach [J]. Applied Geography, 2012, 32: 691-701.
- [18] WANG R, HERTWICH E, ZIMMERMAN J B. (Virtual) Water flows uphill toward money [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50: 12320-12330.
- [19] 张凡凡, 张启楠, 李福夺, 等. 中国水足迹强度空间关联格局及影响因素分析 [J]. 自然资源学报, 2019, 34(5): 934-944.
- [20] HSIAO T C, HENG L, STEDUTO P, et al . AquaCrop-the FAO crop model to simulate yield response to water:

 III . Parameterization and testing for maize[J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3): 448-459.
- [21] RAES D, STEDUTO P, HSIAO T C, et al. AquaCrop-the FAO crop model to simulate yield response to water:

 II . Main algorithms and software description[J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3): 438-447.
- [22] STEDUTO P, HSIAO T C, RAES D, et al. AquaCrop-the FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles[J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3): 426-437.
- [23] CHUKALLA A D, KROL M S, HOEKSTRA A Y. Green and blue water footprint reduction in irrigated agriculture: effect of irrigation techniques, irrigation strategies and mulching[J]. Hydrology Earth System Sciences, 2015, 19(12): 4877-4891.
- [24] WANG W, ZHUO L, LI M, et al. The effect of development in water-saving irrigation techniques on spatial-temporal variations in crop water footprint and benchmarking[J]. Journal of Hydrology, 2019, 577: 123916.
- [25] DALIN C, HANASAKI N, QIU H, et al. Water resources transfers through Chinese interprovincial and foreign food trade[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111: 9774-9779.
- [26] NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC) . Gridded Population of the World, Version 3(GP-Wv3): Population Density Grid [DB/OL] . [2005-12-31] . https://doi.org/10.7927/H4XK8CG2 .
- [27] 高守杰,郭光毅,代希波.基于道路网络分析的省际粮食运输成本研究[J].物流科技,2014,37(5): 135-139.
- [28] YORK R, ROSA E A, DIETZ T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts[J]. Ecological Economics, 2003, 46(3): 351-365.

- [29] ZHAO C, CHEN B, HAYAT T, et al. Driving force analysis of water footprint change based on extended STIR-PAT model: Evidence from the Chinese agricultural sector[J]. Ecological Indicator, 2014, 47: 43-49.
- [30] 龙爱华,徐中民,王新华,等.人口、富裕及技术对2000年中国水足迹的影响[J].生态学报,2006,10:3358-3365.
- [31] JIN C, HUANG K, YU Y, et al. Analysis of influencing factors of water footprint based on the STIRPAT Model: Evidence from the Beijing agricultural sector[J]. Water, 2016, 8(11): 513-525.
- [32] STINE R A . Graphical interpretation of variance inflation factors [J] . American Statistician, 1995, 49(1): 53-56.
- [33] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴2000-2014[M].北京:中国统计出版社,2001-2015.
- [34] 中国机械工业年鉴编辑委员会,中国农业机械工业协会.中国农业机械工业年鉴2000-2014[M].北京:中国统计出版社,2001-2015.
- [35] PORTMANN F T, SIEBERT S, DOLL P. MIRCA2000-Global monthly irrigated and rainfed crop areas around the year 2000: A new high-resolution data set for agricultural and hydrological modeling[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2010, 24: GB1011.
- [36] HARRIS I, JONES PD, OSBORN T J, et al. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations-the CRU TS3 .10 dataset[J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(3): 623-642.
- [37] DIJKSHOORN K, VAN ENGELEN V, HUTING J. Soil and landform properties for LADA partner countries [M]. Wageningen, the Netherlands: ISRIC-World Soil Information and FAO, 2008.
- [38] Food and Agriculture Organization of the United Nations . FAOSTAT on-line database [DB/OL] . [2019-12-15] . http://faostat.fao.org .
- [39] MA J, HOEKSTRA A Y, WANG H, et al. Virtual versus real water transfers within China[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2006, 361(1469): 835-842.
- [40] 中国科学院资源环境科学数据中心.道路数据[DB/OL].[2019-12-15].http://www.resdc.cn/Default.aspx.

Assessment of crop related physical-virtual water coupling flows and driving forces in Yellow River basin

ZHUO La^{1, 3, 4, 5}, LI Meng^{2, 3}, WU Pute^{1, 3, 4, 5}, HUANG Hongrong^{2, 3}, LIU Yilin^{2, 3}

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

- 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;
 - 3. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas, 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)

Abstract: Increasingly limited water resources are the key issue and bottleneck in realizing the ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin. As the conflicts are intensive among water use sectors, virtual water flows embodied in agricultural logistics are enlarged. The current paper estimates the spatial and temporal variations of crop-related physical-virtual water flows in Yellow River Basin over the study period 2000 to 2014, taking the water footprint of crop production and associated virtual water flows as the characteristic parameters. The extended STIRPAT is applied to further identifying the socio-economic driving forces of the physical-virtual water coupling flows. The results show that the crop yield increases effectively reduced the water footprint per unit mass of crops so that the total water footprint in crop production was controlled within a certain scale. Due to exports of wheat, maize and apple, associated virtual water flows were increasing. By the year 2014, total volume of virtual water exports of the basin has reached 41% of its total water consumption. Population and the per capita GDP were identified as the promoting factors for both water footprint of crop production and crop-related virtual water flows.

Keywords: water footprint; virtual water; physical-virtual water coupling flows; driving forces; crop; Yellow River basin

(责任编辑: 韩 昆)