

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0109

管驰明,张洋洋,石常峰.农业虚拟水消耗影响因素分解及时空差异——以西北5省(自治区)为例[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(5):193-201. GUAN C M, ZHANG Y Y, SHI C F. Decomposition of influencing factors of agricultural virtual water consumption and its spatial and temporal differences: A case study of five provinces (autonomous regions) in northwest China[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(5): 193-201. (in Chinese)

农业虚拟水消耗影响因素分解及时空差异

——以西北5省(自治区)为例

管驰明¹,张洋洋¹,石常峰²

(1.东南大学 经济管理学院,南京 211189;2.河海大学 企业管理学院,江苏 常州 213022)

摘要:研究采用LMDI(logarithmic mean divisia index)指数分解模型,将“十一五”“十二五”时期西北5省(自治区)农业虚拟水变化的驱动因素分解为结构效应、强度效应、经济效应和需求效应等,并分别探究不同效应对虚拟水增长的贡献情况及其时空差异。结果显示:农业虚拟水含量在产品结构分布上,畜牧产品>三大主粮>经济作物。从时间角度来看,2006—2015年全区域农业虚拟水含量呈先上升、再下降、再上升的趋势,经济效应和强度效应分别是虚拟水含量变化的主要促进因素和主要抑制因素,总体上,经济效应>强度效应>结构效应>需求效应。“十一五”时期,该区域虚拟水含量变化主要受地区经济增长的影响;“十二五”时期,农业生产结构调整对虚拟水含量增长的抑制作用逐渐增强。从空间角度来看,2006—2015年5省(自治区)虚拟水变化的总效应省际差异显著,新疆正向效应最强,为194.26亿m³,其次为宁夏、青海和陕西,负向效应中甘肃最强,下降了94.11亿m³。据此,从改进农业生产技术、调整生产结构及水生态补偿等方面提出建议,以提高水资源利用率,促进区域经济生态协调发展。

关键词:农业虚拟水;LMDI;驱动效应;时空差异

中图分类号:TV211 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Decomposition of influencing factors of agricultural virtual water consumption and its spatial and temporal differences: A case study of five provinces (autonomous regions) in northwest China

GUAN Chiming¹, ZHANG Yangyang¹, SHI Changfeng²

(1. School of Economics and Management, Southeast University, Nanjing 211189, China;

2. Hohai University College of Management and Economics, Changzhou 213022, China)

Abstract: The Logarithmic Mean Divisin Index(LMDI) index decomposition model are used to divide the driving factors of agricultural virtual water content change into structural, intensity, economic and demand effects in the five northwest provinces (autonomous regions) from the 11th Five-Year plan and 12th Five-Year plan to explore their contributions and its spatial-temporal differences. The research results show that: the agricultural virtual water content in the product structure distribution, livestock products>the three major staples>commercial crops. From the perspective of time, from 2006 to 2015, the agricultural virtual water content in the whole region showed a trend of rising-falling-rising. The economic effects and intensity effects were the main promoting and inhibitory factors of the virtual water content change. In general, Economic effect>intensity effect>structural effect>demand effect, respectively. During the 11th Five-Year Plan period, the change of virtual water content in the re-

收稿日期:2019-10-19 修回日期:2019-12-28 网络出版时间:2020-03-13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20200312.1602.006.html>

基金项目:国家自然科学基金(41701613);中央高校基本科研业务费项目(2019B23014)

作者简介:管驰明(1976—),女,江苏宿迁人,副教授,博士,主要从事区域经济研究。E-mail:guanchiming@163.com

通信作者:石常峰(1985—),男,江苏扬州人,讲师,博士后,主要从事水资源管理研究。E-mail:shichangfeng007@163.com

gion was mainly affected by regional economic growth. During the 12th Five-Year Plan period, agricultural production structure the adjustment has gradually inhibited the growth of virtual water content. From a spatial perspective, the inter-provincial difference in the total effect of the change in virtual water content is significant in the five provinces (autonomous regions) from 2006 to 2015. Xinjiang has the strongest positive effect at $1.9426 \times 10^{10} \text{ m}^3$, followed by Ningxia, Qinghai, and Shaanxi. Negative effects in Gansu is strongest dropped by $9.411 \times 10^9 \text{ m}^3$. Based on this, suggestions from the aspects of improving agricultural production technology, adjusting the production structure, compensating the water ecological environment to reduce the virtual water content in agriculture, improving the utilization of water resources, and promoting the coordinated development of regional economics and ecology.

Key words: agricultural virtual water; LMDI; driving effect; time and space difference

水资源是经济社会可持续发展的重要基础性资源。农业用水长期占据水资源利用的主导地位,约占全球用水需求量的 70%^[1]。中国作为一个传统的农业大国,水资源的高效和可持续利用不仅事关农业的发展,而且涉及 14 亿人口的粮食安全问题,因此,提高农业用水效率、促进农业节水具有重要的现实意义。

英国学者 Allan 教授^[2]于 20 世纪 90 年代首次提出虚拟水(virtual water, VW)的概念,用以说明产品在生产过程中隐形消耗的水资源。虚拟水理论的提出拓展了水资源的认知范畴,为解决水资源短缺和水生态安全问题提供了一个重要思路。国内最早将虚拟水概念引入中国的是中国科学院程国栋院士^[3],他指出虚拟水战略在解决中国西北等地区的水资源缺乏问题具有重要的理论和实践指导意义。Kumar 等^[4]、孙才志等^[5]、龙爱华等^[6]分别从全球、国家和区域尺度论证了虚拟水贸易在保障水安全和粮食安全方面的重要意义。Dennis^[7]通过梳理埃及的农作物生产和国际贸易数据进一步证实了虚拟水贸易在保障国家粮食安全方面的作用。在虚拟水量化研究方面,Hoekstra 等^[8]从生产者角度出发,提出产品的虚拟水含量应根据不同来源的生产状况和水资源利用效率进行计算。李亚娟等^[9]通过测算甘肃农畜产品虚拟水含量发现,由于生态环境等因素的不同,单位质量农产品虚拟水消耗存在较强的空间差异。基于农业虚拟水视角,李新生等^[10]以农业生产-消费为基础分析了京津冀地区农业虚拟水流动特征及其对区域水资源压力的影响,指出京津冀水资源超载问题严重。马超等^[11]提出推行节水技术在一定程度上可以使等量的灌溉用水为农民带来更大的经济收益,提高农业水资源利用效率。Zhao 等^[12]、张晴等^[13]则采用 LMDI 指数分解模型,对苏州以及我国东中西部地区的农业虚拟水量进行测算并探究其影响因素,但

忽略了农产品虚拟水含量的地域差异。通过文献梳理发现,国内外关于农业虚拟水研究主要集中在虚拟水贸易或流动对当地水粮安全的影响等方面,成果较为丰富,但对农业虚拟水自身变化的驱动因素的关注较少。当前学者在驱动因素分解方面采用的方法主要包括结构分解分析法(SDA)和指数分解分析法(IDA)两种^[14],其中,SDA 以投入产出表为基础,对数据要求较高,IDA 在获取各部门综合数据后便可对驱动因素进行分解。2003 年,ANG 在对 SDA 和 IDA 的使用条件和方法进行比较的基础上,提出 LMDI 指数分解法(logarithmic mean divisia index)能明确显示影响被分解因素的关键指标,且不产生残余项,在理论基础、数据选取和结果解释方面具有明显优势^[15]。目前该方法已广泛应用于能源消耗和污染物排放的驱动因素分解研究领域^[16-17]。因此,将该方法应用于甄别农业虚拟水含量变化的内在驱动因素,能够合理揭示农产品生产过程中自身虚拟水变化的时空差异。

西北 5 省(自治区)即陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆,跨年均降水量 800 mm 左右的关中平原至年均降水量不足 50 mm 的塔里木盆地,实际降水少且时空分布不均,是我国典型的缺水地区,水资源短缺成为限制当地农业经济发展的重要因素^[18]。而且西北 5 省区绿水消耗占降水的比例达 70%以上^[19],高效合理配置水资源利用才能真正解决西北地区的经济生态水资源需求。鉴于此,本文以西北 5 省(自治区)为研究对象,基于农业生产视角,定量测算主要粮食作物、经济作物以及畜牧产品生产过程中所消耗的虚拟水量,并采用 LMDI 指数分解方法从时间与空间、整体与局部两个角度探索西北 5 省(自治区)农产品虚拟水含量变化的主要驱动因素。研究结果将为调整农业生产功能分区,规划水资源分配和粮食、畜牧业结构提供有益参考。

1 模型构建与数据来源

1.1 计算方法

农业虚拟水是指农产品(包括粮食作物以及畜牧产品)生产过程中所消耗的水资源量^[20]。考虑到西北地区特殊的自然条件和种植结构,本文的农业研究对象除去林业和渔业,主要涵盖水稻、玉米、小麦三大主粮,棉花、大豆、马铃薯 3 种主要经济作物以及猪肉、牛肉、羊肉和禽蛋 4 种主要畜牧产品。

1.1.1 主要粮食作物虚拟水含量测算

农作物虚拟水含量是指单位质量农产品消耗的虚拟水量^[21],可以根据农作物需水量和产量计算得到,计算公式为

$$CVW(n,i) = \frac{CWR(n,i)}{CY(n,i)} \quad (1)$$

式中:CVW(n,i)表示 n 区域 i 作物单位质量虚拟水含量, m^3/kg ; CWR(n,i)表示 n 区域 i 作物生长期内的需水量, m^3/hm^2 ; CY(n,i)表示 n 区域 i 作物产量, kg/hm^2 。虚拟水由虚拟蓝水和绿水两部分构成。蓝水是指河流、湖泊等地表径流以及地下储水层中的水,常以灌溉的方式输送到农作物;绿水主要源于大气降水以及从土壤中蒸发蒸腾出来的水气,是通过植被蒸发被消耗掉的水资源^[22]。不同地区最低、最高气温、气压、日照时数、相对湿度、平均海拔和风速不同,粮食作物的虚拟水含量也存在一定差别。由于农作物生长期间的需水量大部分取决于其在生长期累积蒸发蒸腾量 ET_c ,所以农作物需水量 CWR(n,i)公式^[23]为

$$CWR(n,i) = ET_c = k_c \times ET_0 \quad (2)$$

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900(e_a - e_d)}{T + 273}}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (3)$$

式中: ET_c 表示 n 区域 i 作物生长期内的累计蒸发蒸腾水量, mm/d ; k_c 为作物系数,用于修正实际作物与参考作物之间的差异; ET_0 为参考作物蒸发蒸腾水量, mm/d 。 ET_0 可采用 CROPWAT 软件中内嵌的 Penman-Monteith 公式进行量化^[24]。其中: Δ 为饱和水汽压和温度相关曲线的斜率; R_n 为作物表面净辐射量, $MJ/(m^2 \cdot d^1)$; G 是土壤热通量, $MJ/(m^2 \cdot d^1)$; γ 为干湿常数, $kPa/^\circ C$; e_a 为饱和水汽压, kPa ; e_d 为实测水汽压, kPa ; T 为平均空气温度, $^\circ C$; U_2 为离地面 2 m 高处的风速, m/s 。

1.1.2 主要畜牧产品虚拟水含量测算

西北 5 省(自治区)主要畜牧产品的单位质量虚拟水含量参考联合国粮农组织 FAOSTAT 数据库中相关数据(表 1)。

根据表 1 西北 5 省(自治区)畜牧产品单位质量虚拟水含量数据,乘以各年畜牧产品产量即可得到西北 5 省(自治区)各年每种畜牧产品的虚拟水含量。该区域畜牧产品虚拟水总量等于每种畜牧产品的虚拟水含量的代数和。

表 1 西北 5 省(自治区)主要畜牧产品单位质量虚拟水含量
Tab. 1 Unit mass VW quantity of major livestock products in the five provinces of Northwest China

单位: m^3/kg	
主要畜牧产品种类	单位质量产品虚拟水含量
猪肉	3.700
牛肉	19.990
羊肉	18.010
禽蛋	8.650

1.2 因素分解模型构建

根据指数分解的难易程度,选取 LMDI 指数分解加法模型,结合 Kaya 恒等式^[25]将虚拟水含量变化的驱动因素分解为

$$VW = \sum_{i=1}^3 \frac{VW_i}{VW} \times \frac{VW}{M} \times \frac{M}{P} \times P \quad (4)$$

式中: VW 表示虚拟水总量, 亿 m^3 ; VW_1 、 VW_2 、 VW_3 分别代表三大主粮、经济作物和畜牧产品虚拟水含量, 亿 m^3 ; M 表示地区农牧业增加值, 亿元; P 代表地区农村常住人口数量, 亿人。假定时间从 $t-1$ 变化到 t , 农业虚拟水含量的变化量可以被分解为结构效应、强度效应、经济效应和需求效应 4 部分, 公式为

$$\Delta VW = \Delta VW_S + \Delta VW_I + \Delta VW_C + \Delta VW_P \quad (5)$$

将式(5)进一步分解整理可得

$$\Delta VW_S = \frac{VW_t - VW_{t-1}}{\ln VW_t - \ln VW_{t-1}} \times \ln \left(\frac{S_t}{S_{t-1}} \right) \quad (6)$$

$$\Delta VW_I = \frac{VW_t - VW_{t-1}}{\ln VW_t - \ln VW_{t-1}} \times \ln \left(\frac{I_t}{I_{t-1}} \right) \quad (7)$$

$$\Delta VW_C = \frac{VW_t - VW_{t-1}}{\ln VW_t - \ln VW_{t-1}} \times \ln \left(\frac{C_t}{C_{t-1}} \right) \quad (8)$$

$$\Delta VW_P = \frac{VW_t - VW_{t-1}}{\ln VW_t - \ln VW_{t-1}} \times \ln \left(\frac{P_t}{P_{t-1}} \right) \quad (9)$$

式中: ΔVW_S 、 ΔVW_I 、 ΔVW_C 、 ΔVW_P 分别为结构效应、强度效应、经济效应、需求效应的虚拟水含量变化量, 即分别表示因农业生产结构调整、农牧业用水强度变化、农业经济增长、农业人口规模变动等引起的虚拟水含量变化量。

1.3 数据来源

计算的时间跨度为 2006—2015 年(“十一五”“十二五”规划时期), 农产品虚拟水含量测算数据主要来源于联合国粮食与农业组织(FAO)和国家气象信息中心。实证分析部分所涉及的数据分别为农业用水量、农牧业增加值和农村年末常住人口数, 该

部分数据主要来源于《中国农业年鉴》和《中国能源统计年鉴》。

2 结果分析

2.1 西北 5 省(自治区)水资源禀赋

西北 5 省(自治区)水土资源配置不平衡,水资

源空间分布与区域环境需水不相协调的矛盾严重阻碍了该区域经济社会长期可持续性发展^[26]。突出表现为:西北 5 省(自治区)占全国 43% 的国土面积,水资源却仅占 8%,生态系统脆弱,对水资源的依赖程度远高于全国其他地区^[27]。西北 5 省(自治区)农业总用水量及农业用水占比情况见表 2。

表 2 西北 5 省(自治区)区农业总用水量及农业用水占比(2006—2015 年)

Tab. 2 Total agricultural water use and proportion in the five northwestern provinces from 2006 to 2015

年份	陕西		甘肃		青海		宁夏		新疆	
	用水总量/ 亿 m ³	用水占比/ %								
2006	56.80	67.55	67.55	94.31	77.09	21.79	67.67	71.73	92.40	469.95
2007	55.51	68.07	96.05	78.41	20.47	65.80	64.75	91.20	476.77	92.09
2008	57.70	67.52	96.93	79.34	22.37	65.10	67.97	91.63	486.15	92.04
2009	57.21	67.83	93.77	77.73	21.61	75.14	65.26	90.35	489.39	92.18
2010	55.47	66.51	94.28	77.39	23.19	75.37	65.05	89.89	484.64	90.57
2011	56.22	64.06	93.84	76.36	23.48	75.38	66.12	89.82	488.41	93.30
2012	58.19	66.09	95.10	77.27	22.48	82.01	61.41	88.55	561.75	95.19
2013	58.06	65.08	99.23	81.34	22.77	80.74	63.44	87.95	557.69	94.84
2014	57.86	64.42	97.78	81.10	21.01	79.76	61.26	87.13	550.99	94.70
2015	57.90	63.49	96.20	80.70	20.90	77.99	62.00	88.07	546.40	94.66
年均	57.09	66.01	95.75	78.67	22.01	74.07	64.90	89.74	511.21	93.18

2006—2015 年,西北 5 省(自治区)农业总用水量整体上呈先上升后下降趋势,且省际差异较大。其中:新疆农业用水量最高,年均 511.21 亿 m³;甘肃次之;其次为宁夏和陕西地区,年均农业用水量分别为 64.90 亿、57.09 亿 m³;青海农业用水量相对较低,年均 22.01 亿 m³。在水资源消耗结构上,5 省区年均农业用水占比分别达到 66.01%、78.67%、74.07%、89.74%和 93.18%,远高于工业用水以及生活用水占比。其中,宁夏地区水资源极度匮乏,年均地表水与地下水资源拥有量仅有 9.82

亿 m³,而实际用水总量达到 72.32 亿 m³,其中约 89.74% 的水资源用于农业生产,这无疑进一步加剧了当地的水资源供需矛盾。因此,从虚拟水视角出发,通过探究西北 5 省(自治区)农业水资源的利用情况,提高农业用水效率对改善当地生态环境、促进经济生态可持续发展具有重要的现实意义。

2.2 农业虚拟水含量时间序列分析

根据 1.1.1 和 1.1.2 节分别计算得出 5 省(自治区)粮食作物和主要畜牧产品虚拟水含量,结果见图 1。

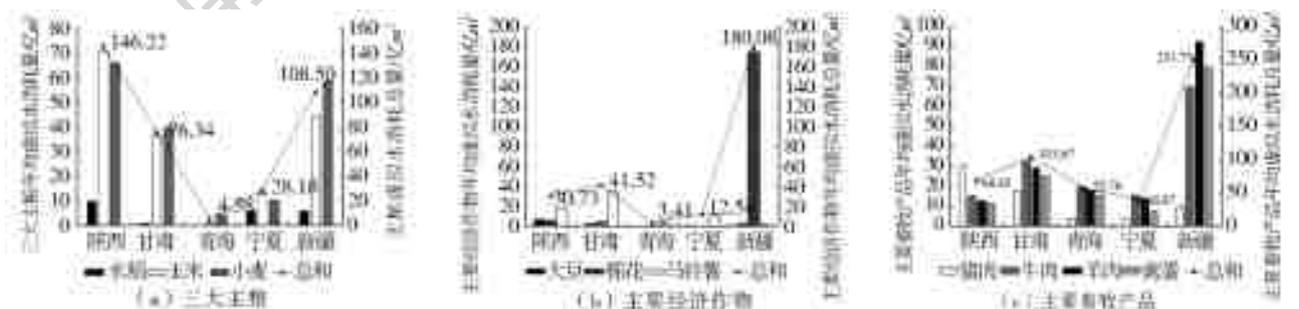


图 1 西北 5 省(自治区)主要农产品年均虚拟水含量(2006—2015 年)

Fig. 1 Annual average VW of major agricultural products in the five northwestern provinces from 2006 to 2015

图 1 显示,在生产结构上,5 省(自治区)农作物虚拟水含量差异显著,三大主粮虚拟水含量高于主要经济作物虚拟水含量。三大主粮中,玉米和小麦

的生产对地区虚拟水含量总量增长贡献最大,水稻虚拟水含量最低;经济作物中,马铃薯和棉花年均虚拟水含量相对较高,且不同省份棉花生产的虚拟水

含量差异较大。从农作物虚拟水含量的省际差异来看:陕西和甘肃虚拟水含量结构较为均衡,三大主粮虚拟水含量高于经济作物;青海由于气候干旱,地形条件限制等原因只种植小麦等耐旱作物,不种植水稻、玉米、棉花和大豆,整体上农作物虚拟水含量较低;宁夏三大主粮年均虚拟水含量占比较高,经济作物几乎没有;新疆主要经济作物年均虚拟水含量最高,其中,棉花生产过程中消耗的虚拟水量最多,高达 175.35 亿 m^3 。

在西北 5 省(自治区)主要畜牧产品生产过程中,牛肉和羊肉的单位质量虚拟水含量最高,分别为 19.99 和 18.01 m^3/kg ,畜牧产品虚拟水总量则主要受各省区畜牧产品产量影响。其中,新疆作为中国四大牧区之一,畜牧产品产量高,耗水尤为明显,年均 251.75 亿 m^3 ,超过其余 4 省(自治区)年均虚拟

水含量总和。从耗水结构来看,5 省(自治区)畜牧产品虚拟水含量结构差异显著。新疆作为畜牧产品大省,牛羊肉和禽蛋的产量最高,对该地区畜牧产品虚拟水含量增长贡献最大;陕西猪肉和牛肉产品年均虚拟水量含量较高,分别为 29.84 亿、15.07 亿 m^3 ;甘肃牛肉和羊肉产品耗水量最大,分别为 32.83 亿、28.94 亿 m^3 ;青海作为我国第四大牧区,但由于畜牧产品产量较低,虚拟水含量相对较低,年均 55.76 亿 m^3 ;宁夏由于土地面积小,产品种类少,作物产量低,年均虚拟水含量仅有 38.87 亿 m^3 ,其中牛肉和羊肉虚拟水含量较高。

在西北 5 省(自治区)虚拟水含量计算的基础上,整理加总西北 5 省(自治区)三大主粮、主要经济作物和畜牧产品虚拟水含量,得出 2006—2015 年近 10 年各省(自治区)虚拟水总量变化情况,结果见图 2。

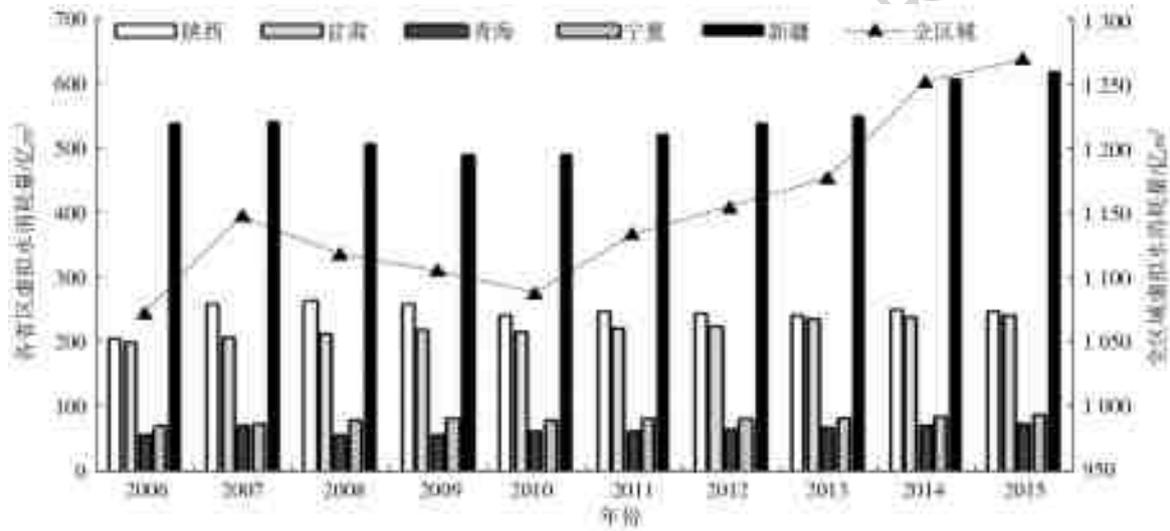


图 2 西北 5 省(自治区)农业虚拟水含量总量年际变化(2006—2015 年)

Fig. 2 Inter-annual variation of total agricultural virtual water in the five northwestern provinces from 2006 to 2015

图 2 中,西北 5 省(自治区)农业虚拟水含量在 2006、2010、2015 年分别达到了 1 071.73 亿、1 087.07 亿和 1 268.71 亿 m^3 ,年均 1 150.94 亿 m^3 ,呈逐年波动上升状态,但增速逐渐放缓。2007 年至 2010 年,西北 5 省(自治区)农业虚拟水含量略有下降;在 2010 年之后,虚拟水含量呈逐年上涨态势,在 2015 年达到最高值 1 268.71 亿 m^3 。从地理位置划分来看:新疆对该地区农业虚拟水含量增长的贡献最大,约占地区虚拟水总量的 46.91%,远高于其余 4 省(自治区);陕西次之,约占 21.39%;青海和宁夏年均虚拟水含量约占西北地区农业虚拟水含量总量的 6%,省际差异显著。

2.3 虚拟水含量变化总效应空间格局分析

利用 LMDI 模型构建的基础,将西北 5 省(自治区)虚拟水含量变化的驱动因素分解为结构效应、

强度效应、经济效应和需求效应 4 个方面,4 个效应之和即为西北 5 省(自治区)虚拟水含量变化总效应,结果见图 3。



图 3 西北 5 省(自治区)虚拟水含量变化总效应(2006—2015 年)

Fig. 3 Total effect of virtual water content change in the five northwestern provinces from 2006 to 2015

从整体虚拟水含量变化的省际差异来看:新疆的农业虚拟水变化量在-26.33 亿至 194.26 亿 m^3 ,对全区域虚拟水含量增长的贡献最大;其次为青海、宁夏以及陕西等 3 省(自治区),虚拟水含量年均累计下降 26.33 亿至 94.11 亿 m^3 ,居于该区域中间水平;甘肃年均虚拟水含量下降最多,对全区域农业虚拟水含量增长起到很大的抑制作用。综合来

看:在数量关系上,西北地区虚拟水含量的增长与各省区经济发展呈正相关;在地理分布格局上,总效应强度从甘肃开始由东向西逐渐增强。

2.4 农业虚拟水含量变化分解效应时间序列分析

根据式(4)、(9),计算得到“十一五”“十二五”时期西北 5 省(自治区)农业虚拟水变化量的驱动效应,见表 3。

表 3 西北 5 省(自治区)农业虚拟水含量变化驱动效应及贡献率(2006—2015 年)

Tab. 3 Driving effects and contribution rates of agricultural VW content change in the five northwestern provinces from 2006 to 2015

地区	“十一五”时期					主要抑制因素	主要促进因素
	结构效应	强度效应	经济效应	需求效应	总效应		
陕西	-11.64 (-42.90)	-161.59 (-595.63)	197.31 (-727.28)	3.05 (11.25)	27.13 (100.00)	强度效应	经济效应*
甘肃	-4.36 (-29.06)	-128.61 (-857.85)	145.37 (969.65)	2.59 (17.26)	14.99 (100.00)	强度效应	经济效应*
青海	22.24 (77.97)	-37.42 (-131.20)	41.16 (144.31)	2.54 (8.91)	28.52 (100.00)	强度效应	经济效应*
宁夏	27.28 (78.16)	-56.5 (-161.91)	70.79 (202.86)	-6.67 (-19.11)	34.9 (100.00)	强度效应	经济效应*
新疆	108.86 (117.31)	-490.82 (-528.92)	484.01 (521.58)	-9.25 (-9.97)	92.8 (100.00)	强度效应*	经济效应
全区域	142.38 (71.79)	-922.87 (-465.30)	1050.79 (529.79)	-71.96 (-36.28)	198.34 (100.00)	强度效应	经济效应*
地区	“十二五”时期					主要抑制因素	主要促进因素
	结构效应	强度效应	经济效应	需求效应	总效应		
陕西	-12.7 (224.38)	-118.9 (2 100.71)	162.19 (-2 865.55)	-36.25 (640.46)	-5.66 (100.00)	强度效应	经济效应*
甘肃	-21.41 (-465.43)	-89.22 (-1 939.57)	138.64 (3 013.91)	-23.41 (-508.91)	4.6 (100.00)	强度效应	经济效应*
青海	-19.69 (282.50)	-15.59 (223.67)	32.45 (-465.57)	-4.14 (59.40)	-6.97 (100.00)	强度效应	经济效应*
宁夏	-24.34 (278.81)	-20.11 (230.36)	40.88 (-468.27)	-5.16 (59.11)	-8.73 (100.00)	强度效应	经济效应*
新疆	21.54 (14.44)	-83.77 (-56.14)	211.74 (141.90)	-0.29 (-0.19)	149.22 (100.00)	强度效应	经济效应*
全区域	-56.6 (-42.72)	-327.58 (-247.27)	585.9 (442.26)	-69.24 (-52.26)	132.48 (100.00)	强度效应	经济效应*

注: * 表示主导因素;驱动效应单位为亿 m^3 ;括号内数据表示贡献率, %。

从农业虚拟水变化驱动效应的变化来看,“十一五”时期,全区域农业虚拟水累计增加了 198.34 亿 m^3 ,主要是由经济增长和农业生产结构调整引起的。新疆虚拟水变化的主导因素为强度效应,贡献率达-528.92%,大于经济效应带来的增长作用,其余 4 省(自治区)的主导因素则均为经济效应。先进农业生产技术的应用在很大程度上抑制了

农业虚拟水含量的增长,新疆和陕西虚拟水含量变化的强度效应表现最为强烈,农业生产技术的提高促使虚拟水分别减少了 490.82 亿、161.59 亿 m^3 。青海、宁夏地区农业生产技术水平则有待进一步改进,提高水资源利用率。“十一五”末期,西北地区农业生产结构重心逐步由三大主粮转向经济作物,结构效应对虚拟水增长的抑制作用也逐渐显现。与

“十一五”时期相比,“十二五”时期全区域虚拟水变化量呈下降趋势,累计减少了 65.86 亿 m^3 。在 4 大分解效应中,经济增长带来的促进作用依然强劲,占据主导地位。其中,甘肃的经济效应最为突出,在“十一五”“十二五”时期对农业虚拟水变化的贡献率分别达到 969.65%和 3 013.91%。由于农业种植结构的转变,主要粮食作物占比降低则对农业虚拟水含量的增长起到显著的抑制作用,需求效应则呈

现出自西向东上升状态。随着时间的变化,地区农业人口流动和农业种植结构调整对虚拟水含量变化带来的影响整体上渐趋稳定。

2.5 农业虚拟水含量变化分解效应空间格局分析

本节采取自然间断点分级法对 2006—2015 年西北 5 省(自治区)农业虚拟水含量变化的分解效应进行展示,其空间分布见图 4。

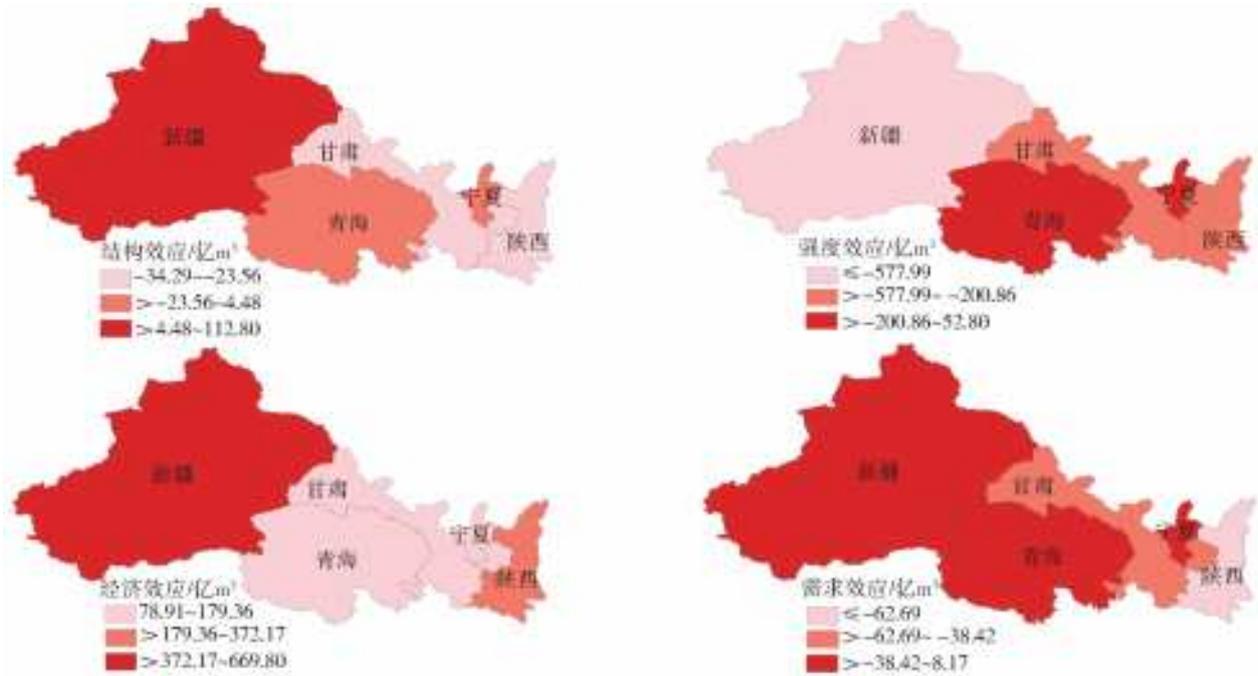


图 4 西北 5 省(自治区)虚拟水含量变化驱动效应分解(2006—2015 年)

Fig. 4 Decomposition of VW content driving effects in the five northwestern provinces from 2006 to 2015

从图 4 可以清晰地看出,在结构效应上,除新疆外 4 省(自治区)农业生产结构变动对农业虚拟水含量的增长均起到一定的抑制作用,且呈现出自西向东逐渐增强的地理分布格局,这主要与西北农业产业结构分布特点息息相关。甘肃、青海、宁夏、新疆 4 省(自治区)畜牧产品虚拟水含量分别占农业虚拟水含量的 46.72%、87.39%、48.59%和 46.63%。其中,新疆地区作为中国第二大牧区,具备畜牧业发展的有利条件,畜牧业年产值约占农业总产值的 20%,畜牧产品虚拟水含量较高。青海作为我国第四大牧区,受气候、地形原因影响,不生产水稻、棉花和大豆等农产品,畜牧业占据农业生产主要地位,畜牧产品虚拟水含量所占比重在该区域达到最高,从而带来农业虚拟水含量的增加。相比之下,陕西三大主粮虚拟水含量占农业虚拟水含量的比重高达 59.42%,生产小麦、玉米和水稻较多,经济作物和畜牧产品较少,这与其余 4 省(自治区)经济模式的发展形成较大反差。

西北 5 省(自治区)虚拟水含量变化的强度效应也呈现出明显的东西差异,农业生产技术改进带来的抑制作用整体上呈现自东向西逐渐增强趋势。其中,新疆作为西北农业生产大省,其先进农业生产技术的实施对虚拟水含量增长的抑制作用尤为显著。“十一五”“十二五”期间,新疆地区由于农田水利设施的完善和生产技术的改进,农业虚拟水含量下降的绝对数额在 577.99 亿 m^3 左右,居全省领先地位。相比新疆地区,以青海、宁夏为代表的地区的强度效应表现较弱,虚拟水含量累计减少约 200.86 亿 m^3 。由此看出,技术效应对西北 5 省区农业虚拟水含量变化的抑制作用省际差距较大,地区农业生产技术协调发展水平有待提升。

与结构效应和强度效应不同,2006—2015 年 5 省(自治区)农业虚拟水变化的经济效应全部为正,虚拟水含量累计增加了 78.91 亿至 669.80 亿 m^3 ,省际差异显著。总体而言,随着各省(自治区)农业经济的增长,农业虚拟水含量也呈上涨态势,且除新

疆外,增长幅度从西向东逐渐扩大。新疆农业虚拟水含量变化的经济效应表现最为强烈,远超其他省(自治区),居于全区域领先地位。2015年,新疆地区农业增加值达1 559.08万亿元,同比增长5%,由此带动的虚拟水含量变化的经济效应达到61.69亿 m^3 ,近似于宁夏地区和青海的10倍。

据图4得出,2006—2015年5省(自治区)农业虚拟水含量变化的人口规模需求效应显示,西北地区的需求效应较为明显地形成新疆、青海、宁夏和甘肃、陕西2个区间。“十一五”“十二五”时期,新疆、宁夏和青海地区虚拟水变化的需求效应稳定在-38.42亿至8.17亿 m^3 ,变化较小;陕西则由于当地人口规模变动对农业虚拟水需求降低,2006—2015年的虚拟水含量累计降低了至少62.69亿 m^3 ,负向效应强度高于其余4省(自治区)。根据未来经济发展的形势,地区间由于人口规模变化所带来的农业虚拟水含量变化的差异将逐渐缩小。

3 结论

本文采用LMDI分解模型将西北5省(自治区)虚拟水含量变化的驱动效应分解为结构效应、强度效应、经济效应和需求效应,并从时间与空间、整体与局部等视角分别探究不同效应对虚拟水含量变化的贡献情况,得到如下结论:

(1)从该区域虚拟水含量变化来看,西北5省(自治区)农业虚拟水含量具有显著的地区差异性。整体上,区域虚拟水含量呈逐年波动上升趋势,年均1 150.94亿 m^3 。其中,青海由于气候原因,主要粮食作物及经济作物种植面积少、产量低,且未种植水稻等高耗水产品,粮食作物的虚拟水含量相对较低,年均63.74亿 m^3 。与此相反,新疆地区由于地域宽广,农田占用面积大,水稻和棉花种植产量高,畜牧业发达,年均虚拟水含量最高,达540.28亿 m^3 ,同时进一步表明新疆地区水资源利用情况需要重点关注。

(2)在时间变化上,与“十一五”时期相比,“十二五”时期该区域虚拟水含量变化的总效应呈下降趋势。“十二五”时期,全区域农业虚拟水含量变化的总效应为132.46亿 m^3 ,相比“十一五”时期下降了大约60亿 m^3 ,主要是经济发展方式由粗放型增长向资源绿色集约式发展转变和第一产业比重下降所引起的。农业经济发展对虚拟水含量增加作出的贡献最大,先进农业生产技术的应用在很大程度上抑制了虚拟水含量的增长,整体上经济发展拉动虚拟水含量增长的正向效应大于生产技术改进抑制虚拟水含量增长的负向作用,结构效应和人口效应的作

用效果相对较小。

(3)在空间分布上,该区域同一时期不同地区农业虚拟水含量变化的驱动因素差异显著。陕西三大主粮虚拟水含量变化量占农业整体虚拟水含量变化量的59.42%,对该省份虚拟水含量增长的贡献最大;青海和新疆地区畜牧业虚拟水含量变化结构占比分别达到46.63%和87.39%,这与当地畜牧业生产条件息息相关。此外,宁夏和甘肃地区农业生产结构占比相对均衡,农业虚拟水含量呈现出从畜牧业-三大主粮-经济作物三级逐层递减态势。

4 讨论与建议

基于以上研究结论,本文从注重空间均衡、提高农业生产技术、调整生产结构和健全水资源生态补偿机制等方面提出如下建议。

(1)农业虚拟水变化的驱动因素研究既要考虑时间范畴,也要注重空间均衡。各地区应根据虚拟水变化驱动因素的时空差异特征,因地制宜、分类施策,这不仅有利于掌握虚拟水变化时空差异的形成原因和驱动因素,各地区间还可以相互借鉴学习成功经验。

(2)坚持节水优先,改进农业生产技术,提高水资源利用效率。先进农业生产技术的应用可以带动农产品产量和水资源利用效率的双重提高,西北5省(自治区)应持续加大农业生产技术的研发投入力度,增强强度效应对虚拟水含量增长的抑制作用,以技术创新促进农业转型。

(3)系统治理,调整农业生产功能分区,优化农业生产结构。由于区域自然环境等的不同,农产品虚拟水含量存在较强的空间差异,各省(自治区)应根据实际条件统筹自然生态各要素,调整农业生产结构,适时改良和引进节水作物品种,合理规划水资源分配和种植业、畜牧业生产结构布局。

(4)两手发力,建立健全水资源生态补偿机制。在市场经济的驱动下,农业虚拟水随着农产品的贸易进行对外输出,为保障西北地区水生态修复能力,建议从地方政府层面入手,明确水资源生态补偿主体、补偿方式和补偿标准,对虚拟水输出区进行补偿,提高当地可持续发展能力。

参考文献:

- [1] 韩昕雪琦,安婷莉,高学睿,等.我国西北地区主要农作物贸易对区域水资源影响[J].南水北调与水利科技,2020,18(1):82-97.
- [2] ALLAN J A, OLMSTED J C. Politics, economics and

- (virtual) water: a discursive analysis of water policies in the middle east and north Africa[J]. *Research in Middle East Economics*, 2003, 5(3): 53-78. DOI: 10.1016/S1094-5334(3)05007-6.
- [3] 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(6): 260-265. DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045. 2003. 04. 006.
- [4] KUMAR M D, SINGH O P. Virtual water in global food and water policy making: is there a need for re-thinking? [J]. *Water Resources Management*, 2005, 19(6): 759-789. DOI: 10.1007/s11269-005-3278-0.
- [5] 孙才志, 韩雪, 秦晓楠. 中国区际间主要农产品虚拟水流动格局稳定性[J]. *地理研究*, 2014, 33(3): 478-489. DOI: 10.11821/dlyj201403007.
- [6] 龙爱华, 徐中民, 张志强. 西北四省(区)2000年的水资源足迹[J]. *冰川冻土*, 2003, 25(6): 692-700. DOI: 1000-0240(2003)06-0692-09.
- [7] DENNIS W. The role of 'virtual water' in efforts to achieve food security and other national goals, with an example from Egypt[J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 49(2): 131-151. DOI: 10.1016/S0378-3774(00)00134-7.
- [8] HOEKSTA 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. DOI: 10.1007/s11269-006-9039-x.
- [9] 李亚娟, 赵军. 农畜产品虚拟水计算与虚拟水战略研究[J]. *人民黄河*, 2012, 34(12): 59-62. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379. 2012. 12. 023.
- [10] 李新生, 黄会平, 韩宇平, 等. 京津冀农业虚拟水流动及对区域水资源压力影响研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(2): 40-48. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk. 2019. 0032.
- [11] 马超, 许长新, 田贵良. 农产品贸易中虚拟水流的驱动因素研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(1): 155-160. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2104. 2012. 01. 025.
- [12] ZHAO X, TILLOTSON M R, LIU YW, et al. Index decomposition analysis of urban crop water footprint [J]. *Ecological Modelling*, 2017, 348: 25-32. DOI: 10.1016/j.ecolmodel. 2017. 01. 006.
- [13] 张晴, 丁雪丽. 中国主要农产品虚拟水变化驱动因素及地区差异分析[J]. *能源与环境*, 2018, 40(1): 76-82, 86. DOI: 10.19389/j.cnki.1003-0506. 2018. 01. 015.
- [14] 张陈俊, 赵存学, 林琳, 等. 长江三角洲地区用水量时空差异的驱动效应研究[J]. *资源科学*, 2018, 40(1): 89-103. DOI: 10.18402/resci. 2018. 01. 09.
- [15] ANG B W. The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide [J]. *Energy Policy*, 2003, 33(7): 867-871. DOI: 10.1016/j.enpol. 2003. 10. 010.
- [16] LI J X, CHEN Y N, LI Z, et al. Low-carbon economic development in Central Asia based on LMDI decomposition and comparative decoupling analyses [J]. *Journal of Arid Land*, 2019, 11(4): 513-524. DOI: 10.1007/s40333-019-0063-0.
- [17] TIAN Y, ZHANG J B, HE Y Y. Research on spatial-temporal characteristics and driving factor of agricultural carbon emissions in China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(6): 1393-1403. DOI: 10.1016/S2095-3119(13)60624-3.
- [18] 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[J]. *水利学报*, 2017, 48(6): 651-660, 669. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb. 20160740.
- [19] 温胜芳, 单保庆, 马静, 等. 水资源缺乏地区地表水环境承载现状研究: 以京津冀和西北五省(自治区)为例[J]. *中国工程科学*, 2017, 19(4): 88-96. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2017. 04. 014.
- [20] 徐欣, 葛宜虎. 中国粮食虚拟水驱动效应与空间联动分析[J]. *水利经济*, 2018, 36(6): 31-36, 72. DOI: 10.3880/j.issn.1003-9511. 2018. 06. 006.
- [21] 孙世坤, 王玉宝, 刘静, 等. 中国主要粮食作物的生产水足迹量化及评价[J]. *水利学报*, 2016, 47(9): 1115-1124. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb. 20150956.
- [22] 方芳, 马琼. 基于情景分析的新疆棉花虚拟水战略环境影响评价[J]. *塔里木大学学报*, 2018, 30(4): 83-89. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0568. 2018. 04. 013.
- [23] 彭世彰, 徐俊增. 参考作物蒸发蒸腾量计算方法的应用比较[J]. *灌溉排水学报*, 2004, 23(6): 5-9. DOI: 1000-646X(2004)06-0005-05.
- [24] 代粮, 刘玉洁, 潘韬. 中国东北三省大豆虚拟水时空分异及其影响因素研究[J]. *地球信息科学学报*, 2018, 20(9): 1274-1285. DOI: 10.12082/dqxxkx. 2018. 180212.
- [25] 马海良, 张格琳. 基于完全分解模型探究我国能源消费结构变化及驱动效应[J]. *软科学*, 2019, 33(2): 101-104, 117. DOI: 10.13956/j.ss.1001-8409. 2019. 02. 21.
- [26] 龙爱华, 徐中民, 张志强. 虚拟水理论方法与西北4省(区)虚拟水实证研究[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(4): 577-584. DOI: 1001-8166(2004)04-0577-08.
- [27] 梁书民, 于智媛. 我国水资源的农业开发潜力评价及对策[J]. *农业经济问题*, 2016, 37(9): 61-70, 111. DOI: 10.13246/j.cnki.iae. 2016. 09. 007.