

DOI:10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2019.0032

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. LI X S, HUANG H P, HAN Y P, et al. Agriculture virtual flow and its impacts on regional water resources in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2): 40-48. (in Chinese)

京津冀农业虚拟水流动及对区域水资源压力影响研究

李新生¹,黄会平^{1,2},韩宇平^{1,3},张冬青¹,任立新⁴,张骁楠¹

(1. 华北水利水电大学, 郑州 450046; 2. 水资源高效利用与保障工程河南省协同创新中心, 郑州 450046;
3. 河南省水环境治理与模拟重点实验室, 郑州 450046; 4. 黄河水利委员会 上游水文水资源局, 兰州 730030)

摘要:水资源安全问题一直是研究热点,基于生产-消费状况揭示区域虚拟水流动,对了解水资源利用状况和水资源可持续利用具有重要意义。基于虚拟水视角,以灌溉用水和绿水核算区域农业虚拟水生产,以居民膳食消费核算居民虚拟水消费,以两者的差值核算并分析了京津冀地区在生产-消费模式下农业虚拟水流动特征及对区域水资源压力的影响。结果表明:2004—2015年,河北、天津、北京年均作物生产虚拟水分别为353.1亿、22.9亿和16.0亿 m^3 ,年均畜牧产品生产虚拟水分别为445.3亿、47.6亿、36.7亿 m^3 ;河北、天津作物虚拟水呈现下降趋势但变化趋势不明显,北京作物生产虚拟水呈现出持续性的下降趋势;河北、天津畜牧产品虚拟水均呈现出先增加后减少最后趋于缓慢上升态势,北京畜牧产品虚拟水呈现持续下降趋势。2004—2015年河北、天津和北京年均虚拟水消费分别为243.7亿、61.6亿和98.3亿 m^3 ,虚拟水消费均呈现出上升趋势。河北省为虚拟水输出型,输出量呈明显的下降趋势,北京市和天津市为虚拟水输入型,输入量呈增加趋势。2004—2015年年均水资源压力指数呈现河北>天津>北京,水资源匮乏度呈现为天津>北京>河北,水资源自给率呈现河北>天津>北京,北京和天津对外部虚拟水输入的依赖程度逐渐增加。京津冀水资源面临着严重的短缺问题,水资源超载严重。提高农业用水效率,优化种植结构,引导合理的膳食结构调整,从生产和消费两方面同时入手是解决京津冀水资源问题的关键措施。

关键词:虚拟水;生产结构;消费结构;水资源压力

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Agriculture virtual flow and its impacts on regional water resources in Beijing-Tianjin-Hebei region

LI Xinsheng¹, HUANG Huiping^{1,2}, HAN Yuping^{1,3}, ZHANG Dongqing¹, REN Lixin⁴, ZHANG Xiaonan¹

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Collaborative Innovation Center of Water Resources Efficient Utilization and Support Engineering, Zhengzhou 450046, China;

3. Henan Key Laboratory of Water Environment Simulation and Treatment, Zhengzhou 450046, China;

4. Yellow River commission upstream hydrology and water resources bureau, Lanzhou 730030, China)

Abstract: The water resources security has always been a research hotspot. It is important to understand the utilization of water resources, as well as the sustainable use of water resources from production to consumption. Based on the perspectives of agriculture virtual water, this paper estimated the regional virtual water production from irrigation water and green water, and resi-

收稿日期:2018-11-15 修回日期:2019-02-16 网络出版时间:2019-03-06

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190304.1449.002.html>

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401402);国家自然科学基金(51679089;51709107)

作者简介:李新生(1993—),男,河南商丘人,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:lixinshenghs@163.com

通信作者:韩宇平(1975—),男,宁夏彭阳人,教授,博士生导师,主要从事水资源系统工程研究。E-mail:han0118@163.com

dent agriculture virtual water consumption from resident dietary consumption, and explored the flow characteristics of agriculture virtual water and its impacts on regional water resource with the production-consumption mode in the Beijing-Tianjin-Hebei region. The results showed that, During 2004—2015, the average annual production of virtual water was 35.31 billion, 2.29 billion, 1.60 billion m^3 in Hebei, Tianjin and Beijing, respectively, and the annual average production of virtual water for livestock products was 29.09 billion, 2.40 billion, 1.79 billion m^3 . Hebei and Tianjin's crop virtual water showed a downward trend but the trend was not statistically significant. Beijing's crop production virtual water appeared a downward trend. The virtual water of livestock products in Hebei and Tianjin showed an increasing trend in the early period, then a decreasing trend, and finally a stable but continuous downward trend in Beijing. During 2004—2015, the average annual virtual water consumption in Hebei, Tianjin and Beijing was 34.37 billion, 6.16 billion, and 9.83 billion m^3 , respectively. Those virtual water consumption all showed an upward trend. Hebei Province exported virtual water, and its output showed a significant downward trend. Beijing and Tianjin were importers of virtual water, and their importing volumes were increasing. The annual average water stress index presented a Hebei>Tianjin>Beijing pattern, water scarcity index Tianjin>Beijing>Hebei, and water self-sufficiency rate Hebei>Tianjin>Beijing from 2004 to 2015. Beijing and Tianjin increasingly depended on external virtual water inputs. Beijing-Tianjin-Hebei are facing water shortage problems as water resources were seriously overexploited. Improving agricultural water use efficiency, optimizing planting structure, and guiding rational dietary structures, and taking both production and consumption into account, are key countermeasures to solve the water problems in Beijing-Tianjin-Hebei region.

Key words: virtual water; production structures; consumption structures; water resources stress

水资源是经济发展的基础,水资源短缺和供需矛盾问题逐渐成为制约经济发展的重要因素。20世纪90年代,Allan教授^[1]提出一种虚拟在商品中用于表示产品在生产过程中所消耗水资源量的指标,并称之为“虚拟水”。虚拟水理论的出现拓展了水文水资源的认知范畴,丰富了解决水问题的途径,虚拟水逐渐成为影响区域水资源管理的重要因素^[2-3]。农业作为最大的用水部门,受到国内外学者广泛的关注,并从虚拟水和水足迹的角度对农产品及衍生品从生产^[4-6]、消费^[7]和贸易^[8]等不同的方面进行研究分析。作物种植结构的调整^[9]和膳食结构的变化^[10-11]对区域水资源需求有重要影响。含在产品中的虚拟水伴随着生产和消费的进行,通过区域贸易产生流动。虚拟水流动完成了虚拟水形态的水资源在地理空间的再分配^[12],通过虚拟水的输入缓解缺水地区的水资源压力成为解决水资源问题的新途径。虚拟水流动的量化主要通过贸易数据或者投入产出表进行计算,前者需要详细的贸易数据,相关研究^[13]多集中于全球和国家尺度,后者主要研究蓝水的流动而对于绿水的考量较少。缺乏区域间贸易数据下,王玉宝等^[12]基于粮食储量不变原则、社会公平性原则、外部不干扰原则测算了我国省级行政区之间的粮食虚拟水流动量并研究了其节水效应和对区域水资源压力的影响,但此方法一定程度上忽略了虚拟水消费的区域差异性。对于京津冀地区虚拟水的流动的研究^[14]多利用多区域投入产出分析进行研究,该方法能够得出区域虚拟水流动状况和区

域产业部门间的虚拟水转移,但无法识别具体产品虚拟水生产和消费并且缺少连续年份的研究。基于生产-消费状况揭示区域虚拟水流动,可以很好地引入绿水资源并表征虚拟水的生产-消费结构和虚拟水流动时间变化。

京津冀地区是我国经济最具竞争力的地区之一,同时也是我国水安全保障难度最大的地区^[15]。2016年京津冀淡水直接使用量达248.6亿 m^3 (其中农业用水58.7%,工业用水12.6%),污水排放量近55亿 t ^[16]。由于生产方式和经济发展,区域生产结构和消费模式不断改变,切实了解京津冀地区的虚拟水生产、消费和流动变化,对了解区域水资源利用状况进而实现水资源可持续利用具有重要意义。基于此本文从生产和消费两方面对区域农业虚拟水进行了研究,并分析了京津冀地区在生产-消费模式下农业虚拟水流动特征及对区域水资源压力的影响。研究结果可为了解水资源短缺和供需矛盾问题构建健康持续发展模式等提供参考。

1 数据和方法

1.1 数据及来源

本文气象数据来源于国家气象科学数据共享服务平台,包括气温、平均风速、日照时数、相对湿度、平均水汽压、逐日降水量以及各气象站点的经纬度、海拔高程等。作物面积、产量和畜产品产量等数据来自《河北农村统计年鉴》以及《中国统计年鉴》。居民消费数据来自《河北经济年鉴》、《天津统计年鉴》

和《北京统计年鉴》。对于部分缺失数据,本文根据已有数据进行了插补延长(对于单一年份缺失采用前后两个年份均值进行插补,对于连续多年数据缺失采用相邻三个年份的均值进行延长),北京市因为统计年鉴中没有城镇居民消费数据,因此结合居民消费支出和商品价格指数进行推求。

1.2 基于生产的虚拟水的量化方法

1.2.1 作物虚拟水

作物单位质量虚拟水($W_{V,crop}$)指单位质量的作物生产过程中消耗的水资源量,包括绿水($W_{V,green}$)、蓝水($W_{V,blue}$)。各作物产量与当年单位质量虚拟水乘积之和即为当年的作物虚拟水总量。考虑到在水资源短缺的大背景下,实际灌溉不可能实现充分灌溉,尤其是我国北方缺水地区。结合省市行政区划的用水数据,文中采用的作物虚拟水计算方法为

$$W_{V,crop} = W_{V,green} + W_{V,blue} = \frac{W_{green}}{Y} + \frac{W_{blue}}{Y} \quad (1)$$

$$W_{green} = 10 \min(ET_c, P_{eff}) \quad (2)$$

$$W_{blue} = IRC \quad (3)$$

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (4)$$

式中: $W_{V,crop}$ 为作物的虚拟水含量(m^3/t); W_{green} 为作物单位面积消耗的绿水资源量(m^3/hm^2); W_{blue} 为作物单位面积消耗的蓝水资源量(m^3/hm^2); Y 表示某作物的单位面积产量(t/hm^2);10为转化系数,将单位由水深(mm)转化为单位面积水量(m^3/hm^2); K_c 为作物系数^[17]; P_{eff} 为有效降水量,采用美国农业部土壤保持局(USDA-SCS)的方法进行计算; ET_0 采用Penman-Monteith公式计算。

W_{IC} 为行政区尺度作物单位面积消耗的灌溉水量(m^3/hm^2),作物单位面积蓝水消耗量 $W_{IC,i}$ 可以利用作物 i 蓝水资源消耗量占种植业蓝水消耗总量的比例进行推求,公式为

$$W_{IC,i} = \frac{W_I \alpha_i}{A_i} \quad (5)$$

式中: W_I 为区域农田灌溉用水总量(m^3); α_i 为作物 i 蓝水消耗量占区域蓝水消耗总量的比例^[18]; A_i 为作物 i 的播种面积(hm^2)。

W_I 和 α_i 可以由以下公式推求

$$W_{Agriculture} = W_{Irrigation} + W_{Forest, fruit} + W_{Fisheries} + W_{livestock} \quad (6)$$

$$\alpha_i = \frac{(ET_c^i - P_{eff}^i) \times A_i}{\sum_{i=1}^n [(ET_c^i - P_{eff}^i) \times A_i]} \quad (7)$$

式中: $W_{Agriculture}$ 为农业用水量(m^3); $W_{Irrigation}$ 为农田灌溉用水(m^3); $W_{Forest, fruit}$ 为林果灌溉用水(m^3);

$W_{Fisheries}$ 为渔业用水(m^3); $W_{livestock}$ 为牲畜用水(m^3);各用水数据可根据水资源公报数据进行推求。 ET_c^i 为作物 i 生育期的蒸发蒸腾量(mm),当作物生育期有效降水量大于作物需水量时, α_i 为零。

1.2.2 畜牧产品虚拟水

畜类活体的虚拟水含量取决于其整个生长过程中消耗的淡水资源量,包括饲养所用的作物包含的虚拟水含量、日常饮用水和清洁圈舍和卫生所产生的服务用水^[19]。不同区域发展程度和地理位置的差异决定了畜类饲养方式和饲料构成的不同,从而导致虚拟水含量的差别。畜牧产品的虚拟水含量则取决于牲畜的种类和在加工这种产品过程中所消耗的水。由于牲畜及部分作物产品虚拟水含量的计算较为复杂,由此相关产品的虚拟水含量(蓝水和绿水),本文中直接采用文献^[5, 20]已有成果,见表 1。

表 1 畜牧及部分农产品虚拟水含量

Tab. 1 Virtual water contents of livestock and agricultural products 单位: m^3/t

产品	虚拟水含量	产品	虚拟水含量
猪肉	5 455	禽蛋	2 482
牛肉	13 290	水产品	3 111
羊肉	5 799	食糖	1 671
家禽	3 117	酒	270
牛奶	1 072	食用油	7 087

1.3 基于消费的虚拟水量化方法

消费虚拟水指区域内居民通过消费从而达到占据消费品中所包含的水资源量。虚拟水消费量计算公式为

$$W_V = \sum_i^n V_i \times P_i \quad (8)$$

式中: W_V 为总的虚拟水消费量; V_i 为第 i 种产品的虚拟水含量; P_i 为第 i 种产品的消费量。但是需要注意的是往往随着气候条件的变化和生产管理水平的提高,产品单位质量生产虚拟水含量是变动的。而且不同产地消费产品的虚拟水含量,由于生产和地域差异性往往也会有很大的不同。由此本文消费虚拟水的求解中,作物虚拟水含量结合作物虚拟水量化方法进行求解,针对畜牧产品和个别农产品直接采用表 1 中所给数据。

1.4 生产-消费模式下的农业虚拟水流动核算方法

作物生产是区域虚拟水流动的基础,作物通过生长发育将区域水资源转化为作物产品所包含的虚拟水。作物产品虚拟水主要向区域消费和作为饲料为牲畜生长发育提供保障,多余的部分则作为产品

进行对外输出。畜牧产品生产虚拟水一部分来源于区域饲料,另一部分消耗来源于饲料的外部输入。而畜牧产品虚拟水的输出端,包含区域消费和作为产品的对外输出。区域消费包含区域内部产品的供给和外部产品的输入。基于区域农业在生产-消费模式下虚拟水流动过程见图 1。



图 1 生产-消费模式下农业虚拟水流动过程
Fig. 1 Agriculture virtual water circulations under production-consumption model

可见,在各个环节中总伴随着产品的输出和输入的进行,考虑到已有统计数据中缺乏农产品数据的储存与区域间贸易数据,本部分农业虚拟水流动的计算过程基于区域农产品储存量不变、本地输入农产品和输出农产品单位质量水足迹相等假设条件下进行,具体方法为

$$W_{V,F} = W_{V,pro} - W_{V,con} \quad (9)$$

式中: $W_{V,F}$ 为虚拟水流动量; $W_{V,pro}$ 为区域虚拟水生产量; $W_{V,con}$ 为区域虚拟水消费量。

若 $W_{V,pro} > W_{V,con}$,即区域的虚拟水输出到其它地区(国家),差值为输出量。

若 $W_{V,pro} < W_{V,con}$,即区域虚拟水需要从其它地区(国家)输入,差值为输入量。结合图 1 的虚拟水流动过程对式(8)进行细化为

$$W_{V,F} = (W_{V,pro-crop} + W_{V,pro-livestok}) - (W_{V,con-crop} + W_{V,con-livestok}) - W_{V,fodder} \quad (10)$$

式中: $W_{V,F}$ 为虚拟水流动量; $W_{V,pro-crop}$ 为作物生产虚拟水; $W_{V,pro-livestok}$ 为畜牧产品生产虚拟水; $W_{V,con-crop}$ 为消费作物产品虚拟水; $W_{V,con-livestok}$ 为消费畜牧产品虚拟水; $W_{V,fodder}$ 为饲养牲畜的饲料包含的虚拟水。其中, $W_{V,fodder}$ 可用下式进行估算

$$W_{V,fodder} = W_{V,pro-livestok} - W_{V,livestok-feed} \quad (11)$$

式中: $W_{V,livestok-feed}$ 为牲畜生活用水。

1.5 基于虚拟水的水资源利用评价指标

根据广义的水资源理论,借鉴文献[21-22]指标方法讨论农业虚拟水生产、消费和流动对区域水资源利用和水资源压力的影响。

(1)水资源压力指数(W_P)。该指标反映区域生产虚拟水对区域可用水资源量作用强度。

$$W_P = \frac{W_{V,pro}}{W_A} \times 100\% \quad (12)$$

(2)水资源匮乏度(W_S)。该指标反映水资源的紧缺状态,当满足区域消费和服务的生产需水量大于区域可用水资源量时, W_S 的值将大于 100%,指标值越大说明缺水状况越严重。

$$W_S = \frac{W_{V,con}}{W_A} \times 100\% \quad (13)$$

(3)水资源自给率(W_{SS})。该指标反映区域消费虚拟水中本地区生产虚拟水所占的比例,所占的比例越大表明自给率越高。本文中当生产虚拟水大于消费虚拟水时,自给率为 100%。

$$W_{SS} = \frac{W_{V,F,pro}}{W_{V,F,con}} \times 100\% \quad (14)$$

式中: $W_{V,F,pro}$ 为区域农业生产虚拟水; $W_{V,F,con}$ 为区域农业消费虚拟水; W_A 为区域可用水资源总量。

2 结果与讨论

2.1 生产虚拟水时间变化

2.1.1 作物生产虚拟水

图 2 为京津冀地区 2004—2015 年作物生产虚拟水年际变化。其中河北省作物生产虚拟水年均 353.1 亿 m^3 远高于北京和天津,在 312.1~394.0 亿 m^3 上下起伏波动,整体呈现下降趋势,但变化趋势并不明显。天津市年均作物生产虚拟水 22.9 亿 m^3 ,年际间变化幅度较小。北京市由于作物种植面积和生产结构的调整,作物生产虚拟水呈现出了持续性的下降趋势,由 2004 年的 17.5 亿 m^3 降为 2015 年的 10.5 亿 m^3 。从作物虚拟水构成来看,玉米所占的虚拟水比例逐渐增加而小麦和水稻所占比例逐步降低。参照文献[23]研究成果,京津冀地区玉米等单位质量蓝水需求量较低,对灌溉水需求较少;水稻,小麦等灌溉需水较大;这种种植结构的变化一定程度上减轻了农业灌溉需水压力。

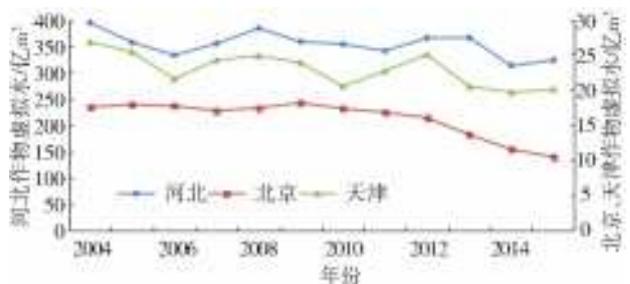


图 2 京津冀地区作物虚拟水年际变化(2000—2015)
Fig. 2 Crop virtual water in Beijing-Tianjin-Hebei during 2000 to 2015

2.1.2 畜牧产品虚拟水

京津冀地区 2004—2015 年畜牧产品虚拟水年际变化见图 3。京津冀地区畜牧产品虚拟水 2004 和 2005 年明显高于其他年份。2004—2005 年,河北、天津畜牧产品虚拟水均呈现出上升趋势,北京市畜牧产品虚拟水略有减少。2006 年畜牧产品虚拟水发生了锐减,这与当地畜牧养殖规模的改变有着密切的关联,较 2005 年河北省、天津和北京畜牧产品虚拟水分别减少了 124.7 亿、14.0 亿和 11.6 亿 m^3 ,相当于当年畜牧产品虚拟水的三分之一。2006—2015 年河北和天津畜牧产品虚拟水含量平缓上升,而北京变为了略微下降的变化趋势。2004—2015 年京津冀年均畜牧产品虚拟水河北、天津和北京分别为 445.3 亿、47.6 亿、36.7 亿 m^3 。从生产结构来看,高耗水的畜牧产品虚拟水如牛肉所占比例逐渐的下降,禽蛋和猪肉等低耗水产品所占比例进一步增加,这种生产结构的变化有利于减轻畜牧业对水资源的需求。

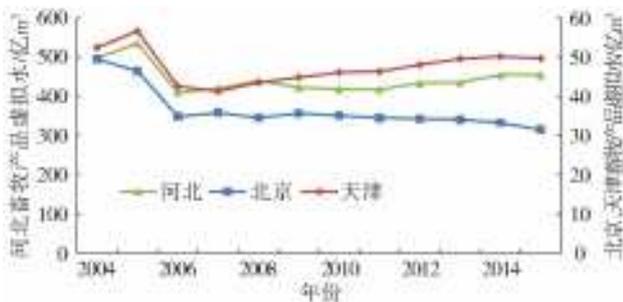


图 3 京津冀地区畜牧产品虚拟水年际变化(2000—2015)

Fig. 3 Livestock virtual water of in Beijing-Tianjin-Hebei during 2000 to 2015

2.2 虚拟水消费变化

2.2.1 虚拟水消费时间变化

由于缺乏北京市 2004 年前的居民消费数据,本文计算了 2004—2015 年京津冀地区虚拟水消费(图 4)。河北、天津和北京虚拟水消费均呈现出上升趋势,这与当地经济发展、城市化进程加快和人民生活水平的提高存在密切联系,同时也反映出居民用水需求的进一步增加,给该地区的用水保障问题带来更大的挑战。河北、天津和北京年均虚拟水消费分别为 243.7 亿、61.6 亿和 98.3 亿 m^3 ,远高于区域水资源总量。与 2004 年相比,河北、天津和北京 2015 年消费虚拟水分别增加 17.9 亿、29.7 亿和 24.3 亿 m^3 。2004—2015 年人均消费水足迹河北、天津和北京分别为 342.4、483.6 和 526.9 m^3/a ,人均消费虚拟水同区域发展程度密切相关,经济越发达的地方人均消费虚拟水量越高。

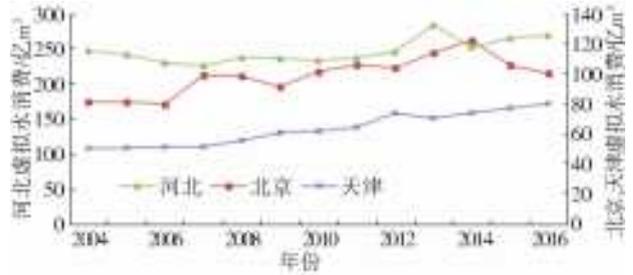


图 4 京津冀地区虚拟水消费年际变化(2004—2015)

Fig. 4 Virtual water consumptions in Beijing-Tianjin-Hebei during 2004 to 2015

2.2.2 虚拟水消费结构变化

为了解消费结构的变化,本文选取了 2005、2010 和 2015 年为典型年,见图 5。由于人们生活水平的提高和消费观念的改变,虚拟水消费结构呈现出显著变化和区域特性。以 2005 年为例,河北省粮食虚拟水消费比例远高于天津和北京,畜类产品消费比例略低。与 2005 年相比,河北省 2015 年粮食虚拟水消费比例下降了 13%,虚拟水消费量下降了 27.4 亿 m^3 ,畜类产品虚拟水消费所占比例增加了 7%,虚拟水消费量增加了 27.1 亿 m^3 ,消费结构更加均衡。天津和北京粮食虚拟水消费比例略有减少,食用油虚拟水消费则呈现出增加的趋势。对畜类产品虚拟水消费天津市比较稳定,而北京市呈现下降趋势。考虑消费产品虚拟水含量,对畜类产品的大量消费势必增加区域用水需求,而瓜果蔬菜等低虚拟水含量产品消费的增加能减少消费虚拟水需求,从而改变居民消费观念,引导居民膳食结构的调整,是减少虚拟水消费的有效方式。

2.3 生产-消费模式下农业虚拟水流动变化

本文采用农业虚拟水生产与消费差额表示虚拟水流动量的指标,分析区域生产-消费模式下的虚拟水流动状况。输入产品相当于节省了同样产量的本地产品生产需要消耗的虚拟水量,按照生产、消费的同类型产品,单位质量虚拟水含量是与当地作物生产虚拟水是相等的思想进行论述。

京津冀地区 2004—2015 年农业虚拟水流动变化见表 2。在生产结构、消费结构和人口变化等原因的共同影响下,区域农业虚拟水流动发生了明显的变化。其中河北省为虚拟水输出型,输出量呈明显的下降趋势,由 2004 年的 151.7 亿 m^3 减少到 2015 年的 62.0 亿 m^3 年均减少 8.2 亿 m^3 。北京市和天津市为虚拟水输入型,输入量呈增加趋势。相比 2004 年,2015 年天津和北京虚拟水输入量增加了 33.3 亿 m^3 和 31.5 亿 m^3 。考虑京津冀一体化的大背景,在生产-消费模式下可以看出京津冀从虚拟水

输出型转变为虚拟水输入型,区域农业生产虚拟水已经不能满足于区域虚拟水需求,京津冀对外部虚

拟水输入的依赖性逐步加强,虚拟水流入逐渐成为缓解京津冀水资源短缺问题的重要一环。

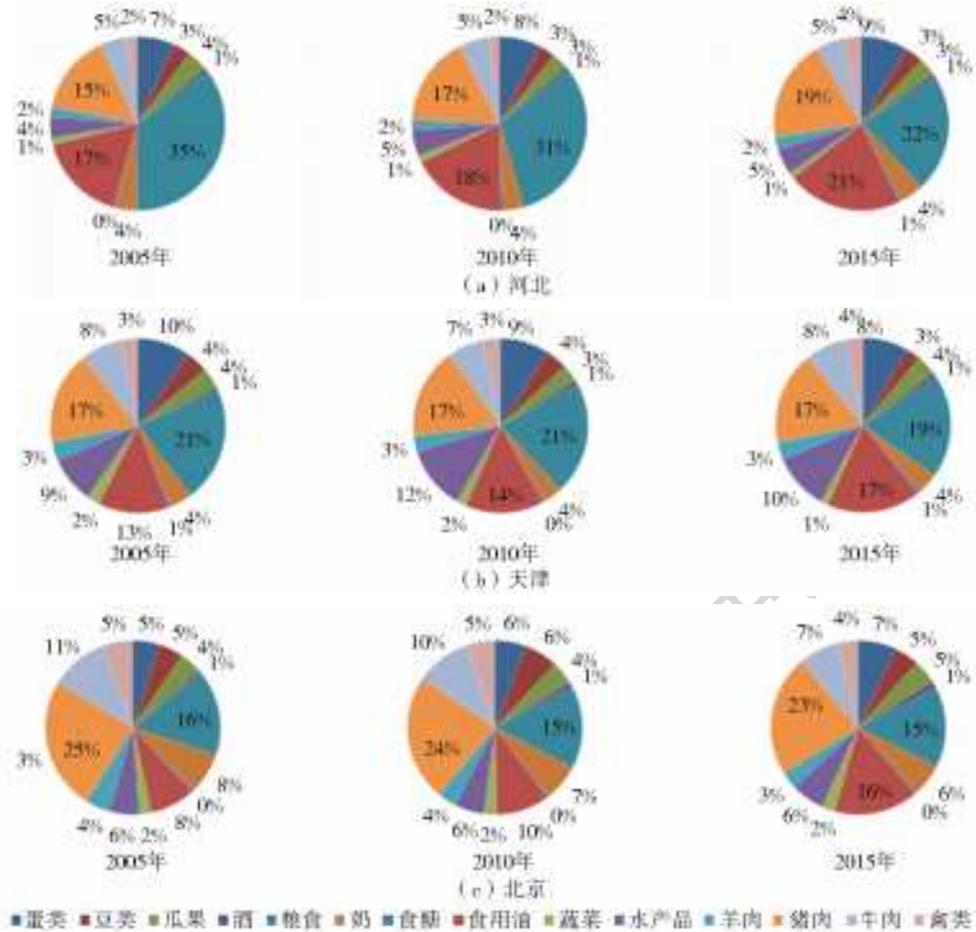


图 5 京津冀地区典型年虚拟水消费结构

Fig. 5 Virtual water consumption structures of Beijing-Tianjin-Hebei in a typical year

表 2 京津冀地区农业虚拟水流动变化(2004—2015)

Tab. 2 Change of agriculture virtual water circulations in Beijing-Tianjin-Hebei during 2004 to 2015 单位:亿 m³

年份	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
河北	151.7	119.8	107.6	133.1	150.3	126.1	123.9	107.8	123.9	85.9	63.9	62.0
天津	-23.3	-25.0	-29.3	-26.9	-30.3	-36.5	-40.9	-41.2	-48.3	-49.5	-53.8	-56.6
北京	-63.1	-62.9	-61.5	-81.3	-80.1	-72.8	-83.6	-88.6	-87.3	-99.5	-110.1	-94.6
京津冀	65.3	31.9	16.8	25.0	39.9	16.9	-0.6	-22.0	-11.8	-63.1	-100.0	-89.3

注:虚拟水流动量正值表示为输出量,负值表示为输入量。

2.4 农业虚拟水流动对区域水资源压力影响

基于农业虚拟水的核算,本文采用水资源压力系数、水资源匮乏度和水资源自给率三个指标分析农业虚拟水的生产、消费和流动对区域水资源利用和水资源压力产生的影响,见表 3。

2004—2015 年年均水资源压力指数呈现河北>天津>北京,水资源匮乏度呈现为天津>北京>河北,水资源自给率呈现河北>天津>北京。其中年年均水资源压力指数河北和天津分别为 297%和 175%,表示两个地区产品生产虚拟水大于可用水量,区域水资源承压较大处于超载状态,这与区域

生产结构密切相关。河北是典型的农业大省,是我国粮食主产区,为保障区域粮食安全农业需水量旺盛,所以水资源承压较大。天津市水资源压力指数变幅比较稳定,但水资源一直处于超载状态。北京市水资源压力小于 100%,并趋于下降,一方面是由于北京市农业种植面积的消减和种植结构的改变带来的农业需水量减少,另一方面南水北调等外部输水增加了区域水资源可利用量减轻了北京水资源压力。2004—2015 年河北、北京和天津年均水资源匮乏度分别为 172%、396%和 460%,三个地区可利用水资源量均不能够满足区域消费的产品和服务的生产需水量,天津

和北京的缺水程度远高于河北。2004—2015 年河北、北京和天津年均水资源自给率分别为 100%、17% 和 39%。可以看出北京市水资源自给程度最低, 83% 消费虚拟水严重依赖外部的输入。对比三个地区水资源压力指数和水资源自给率可以看出, 水资源自给率越高, 水资源压力指数越高, 北京和天津通过

虚拟水的流入极大程度的缓解了区域水资源压力。考虑京津冀一体化背景下, 2004—2015 年京津冀年均水资源压力指数 219%, 水资源匮乏度为 224%, 水资源自给率为 95%。可见京津冀水资源面临着严重的短缺问题, 水资源系统严重超载, 虚拟水输入逐渐成为区域消减水资源压力的有效措施。

表 3 京津冀水资源利用评价指标(2004—2015)

Tab. 3 Indicators for assessing water resources utilization in Beijing-Tianjin-Hebei during 2004 to 2015

指标 年份	水资源压力指数/%				水资源匮乏度/%				水资源自给率/%			
	河北	北京	天津	京津冀	河北	北京	天津	京津冀	河北	北京	天津	京津冀
2004	258	84	189	233	160	379	351	199	100	22	54	100
2005	268	79	241	240	179	350	476	221	100	22	51	100
2006	314	82	215	270	213	360	505	258	100	23	43	100
2007	299	73	216	258	188	414	454	242	100	18	48	100
2008	240	52	137	201	147	286	303	183	100	18	45	100
2009	256	84	158	226	166	418	398	217	100	20	40	100
2010	257	76	225	230	167	438	669	231	100	17	34	100
2011	219	63	149	193	150	394	417	204	100	16	36	95
2012	157	41	77	133	104	262	223	137	100	16	34	97
2013	210	56	142	187	161	457	479	217	100	12	30	86
2014	297	58	175	252	237	600	648	324	100	10	27	78
2015	241	40	158	204	196	393	601	256	100	10	26	80
均值	251	66	174	219	172	396	460	224	100	17	39	95

3 讨论

面对经济发展、人口增长、用水竞争的挑战, 虚拟水拓宽了传统水资源系统的研究领域, 为我们研究水问题提供了新的视角。通过明确作物虚拟水含量的区域差异性和作物种类差异性, 进行合理的作物种植规划有着很大的节水空间^[9]。消费模式同样对水资源有重大影响, 通过虚拟水的进口来满足增长的虚拟水消费需求, 已经成为缓解水资源压力的重要途径^[7]。通过省际间的贸易 2010 年我国粮食虚拟水流动节水约 580 亿 m³, 而粮食虚拟水流动则增加了虚拟水输出省份的水资源压力。可以看出探讨虚拟水生产、消费和贸易等多方面对于水资源的影响, 对于作物种植规划、膳食和贸易结构的调整具有重要的参考意义。

水资源问题一直是京津冀面临的主要挑战之一, 为缓解京津冀用水, 跨流域调水, 如南水北调等调水工程逐步开展, 但是湿地萎缩、水质恶化、地下水下降和地下漏斗等由水资源过度开发带来的问题依旧严峻, 仅仅依靠输水工程无法满足京津冀用水需求。本文研究结果表明: 2015 年京津冀区域农业虚拟水输入量为 89.3 亿 m³, 通过虚拟水的流动产生的水资源输入给京津冀区域发展提供了有力支

撑。以北京市为例, 通过对种植规模和生产结构的改变由农业生产带来的水资源压力指数由 2004 年的 84% 减少为 2015 年的 40%, 为工业, 生态, 地下水补给等拓宽了用水空间, 有效支撑了北京的经济。但是同样应该看到, 这种发展模式是以高水资源匮乏度和低自给率为代价的, 对外部虚拟水输入有着很高依赖性, 并不适合所有的地域, 同时也给输水地区带来较大的水资源压力。而对水资源超载式的开发利用, 来满足区域用水需求, 显然是不可为继的发展模式。由此, 基于区域的发展定位, 在水资源和生态环境承载力内, 基于提高用水效率, 控制生产规模, 调整生产结构, 引导健康消费模式的适水发展模式才能达到人水和谐的可持续发展。由于本文中只涉及农业产品的生产、消费和流动, 没有涉及工业产品等其他产业部门的流动。但其他部门虚拟水研究同样是不可忽视的, 开展虚拟水生产、消费和流动的系统研究是今后需要开展的研究课题。

4 结论

本文从虚拟水角度, 核算和分析京津冀地区在生产-消费模式下产生的农业虚拟水生产、消费和流动变化, 并研究了农业虚拟水流动下区域水资源利

用和水资源压力情况。结论如下。

(1)2004—2015年河北、天津和北京,年均作物生产虚拟水分别为353.1亿、22.9亿和16.0亿 m^3 ,其中河北和天津作物虚拟水处于波动状态,无显著变化,北京作物生产虚拟水呈现出持续性的下降趋势;河北、天津和北京年均畜牧产品虚拟水分别为445.3亿、47.6亿、36.7亿 m^3 ,河北和天津畜牧产品虚拟水先增加后减少最后平缓上升,北京畜牧产品虚拟水呈现持续下降趋势。

(2)2004—2015年河北、天津和北京年均虚拟水消费分别为243.7亿、61.6亿和98.3亿 m^3 ,虚拟水消费均呈现出上升趋势。从消费结构来看,河北省粮食虚拟水消费比例呈下降趋势,畜牧产品消费比例呈上升趋势;天津和北京粮食虚拟水消费比例略有减少,食用油虚拟水消费则呈现出增加的趋势,对畜牧类产品虚拟水消费天津市比较稳定,而北京市呈现下降趋势。

(3)在生产结构、消费结构和人口变化等原因的共同影响下,区域虚拟水流动发生了明显的变化。河北省为虚拟水输出型,输出量呈明显的下降趋势,北京市和天津市为虚拟水输入型,输入量呈增加趋势。

(4)以农业生产对区域水资源影响为视角,2004—2015年年均水资源压力指数呈现河北>天津>北京,水资源匮乏度呈现为天津>北京>河北,水资源自给率呈现河北>天津>北京,北京和天津对外部虚拟水输入的依赖程度逐渐增加,京津冀水资源面临着严重的短缺问题,水资源系统超载问题严重。

参考文献(References):

[1] ALLAN J A. Overall perspectives on countries and regions. In Rogers, P. and Lydon, P. edits. Water in the arab world: perspectives and prognoses[M]. Massachusetts: Harvard University Press, 1994, 65-100.

[2] 韩宇平,雷宏军,潘红卫,等.基于虚拟水和广义水资源的区域水资源可持续利用评价[J].水利学报,2011,42(6):729-736. (HAN Y P, LEI H J, PAN H W, et al. Evaluation on water resources sustainable utilization based on virtual water and generalized water resources theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(6):729-736. (in Chinese))

[3] 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. (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[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016,

32(12):1-10. (in Chinese)) DOI: 10. 11975/j. issn. 1002-6819. 2016. 12. 001.

[4] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. National water footprint accounts; the green, blue and grey water footprint of production and consumption. Value of Water Research Report Series No. 50 [R]. Delft: UNESCO-IHE, 2011.

[5] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. A global assessment of the water footprint of farm animal products[J]. Ecosystems, 2012, 15(3): 401-415. DOI: 10. 1007/s10021-011-9517-8.

[6] 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. (WU P T, SUN S K, WANG B Y, et al. Research on the quantification methods for water footprint of crop production [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(6): 651-660, 669. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20160740.

[7] LIU J, SAVENIJE H H G. Food consumption patterns and their effect on water requirement in China. [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 12, 3(2008-06-11), 2008, 5(1): 27-50. DOI: 10. 5194/hess-12-887-2008.

[8] SCHWARZ J, MATHIJS E, MAERTENS M. Changing patterns of Global Agri-Food Trade and the economic efficiency of virtual water flows[J]. Sustainability, 2015, 7(5): 5542-5563. DOI: info: doi/10. 3390/su7055542.

[9] 黄会平,曹明明,宋进喜,等.河南省农作物虚拟水含量时空分异特征[J].地域研究与开发,2015,34(3):167-171,176. (HANG H P, CAO M M, SONG J X, et al. Spatial-temporal characteristics of crop virtual water in Henan Province based on GIS[J]. Regional Research and Development, 2015, 34(3): 167-171, 176. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-2363. 2015. 03. 030.

[10] HESS T, ANDERSSON U, MENA C, et al. The impact of healthier dietary scenarios on the global blue water scarcity footprint of food consumption in the UK[J]. Food Policy, 2015, 50: 1-10. DOI: 10. 1016/j. foodpol. 2014. 10. 013.

[11] 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. (SUN S K, WANG Y B, LIU J, et al. Quantification and evaluation of water footprint of major grain crops in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(09): 1115-1124. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20150956.

[12] 王玉宝,吴普特,孙世坤,等.我国粮食虚拟水流动对水资源和区域经济的影响[J].农业机械学报,2015,

- 46(10):208-215. (WANG Y B, WU P T, SUN S K, et al. Impact of virtual water flows of grain on water resources and regional economy in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 208-215. (in Chinese)) DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2015. 10. 027.
- [13] 郭相平, 余涛, 吴梦洋, 等. 中国省区虚拟水流动及对农业用水的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(8): 744-749. (GUO X P, YU T, WU M Y, et al. Virtual water flow and its impact on agricultural water utilization among provinces of China[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(8): 744-749. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-8530. 18. 1025.
- [14] 曹涛, 王赛鸽, 陈彬. 基于多区域投入产出分析的京津冀地区虚拟水核算[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 788-799. (CHEN T, WANG S G, CHEN B. Virtual water analysis for the Beijing-Tianjin-Hebei region based on multiregional input-output model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(3): 788-799. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/stxb201612122549.
- [15] 鲍超, 贺东梅. 京津冀城市群水资源开发利用的时空特征与政策启示[J]. 地理科学进展, 2017, 36(1): 58-67. (BAO C, HE D M. Spatiotemporal characteristics of water resources exploitation and policy implications in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. Progress in geography, 2017, 36(1): 58-67. (in Chinese)) DOI: 10. 18306/dlkxjz. 2017. 01. 006.
- [16] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017. (National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2017. (in Chinese))
- [17] 段爱旺, 孙景生, 刘钰, 等. 北方地区主要农作物灌溉用水定额[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004. (DUAN A W, SUN J S, LIU Y, et al. Irrigation water quota of main crops in northern China [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2004. (in Chinese))
- [18] SUN S, WU P, WANG Y, et al. The impacts of inter-annual climate variability and agricultural inputs on water footprint of crop production in an irrigation district of China[J]. Science of the Total Environment, 2013, 444(2): 498. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2012. 12. 016.
- [19] 曹建廷, 李原园, 张文胜, 等. 农畜产品虚拟水研究的背景、方法及意义[J]. 水科学进展, 2004(6): 829-834. (CAO J T, LI Y Y, ZHANG W S, et al. Research background, methodological issues and significance on virtual water of crop and livestock production [J]. Advances in Water Science, 2004(6): 829-834. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1001-6791. 2004. 06. 025.
- [20] CASTILLO R M, FENG K, HUBACEK K, et al. Uncovering the Green, blue, and grey water footprint and virtual water of biofuel production in Brazil: A nexus Perspective[J]. Sustainability, 2017, 9(11): 2049. DOI: 10. 1016/j. ecoecon. 2010. 11. 012.
- [21] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y. Water footprints of nations[C]//Value of Water Research Report Series; No. 16. Delft, the Netherlands: IHE, 2004, 1-80.
- [22] 戚瑞, 耿涌, 朱庆华. 基于水足迹理论的区域水资源利用评价[J]. 自然资源学报, 2011, 26(3): 486-495. (QI R, GENG Y, ZHU Q H. Evaluation of regional water resources utilization based on water footprint method [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(3): 486-495. (in Chinese)) DOI: 10. 11849/zrzyxb. 2011. 03. 015.
- [23] 韩宇平, 李新生, 黄会平, 等. 京津冀作物水足迹时空分布特征及影响因子分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 26-34. (HAN Y P, LI X S, HANG H P, et al. Spatial and temporal distribution of water footprint of main crops and its influencing factors in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 26-34. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2018. 0093.