

虚拟水视角下我国主粮贸易对水资源压力的影响

赵一丹, 陈红* (东北林业大学经济管理学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

摘要 对2009—2019年我国主要粮食作物产量和生产消耗虚拟水量进行测算, 量化分析伴随主粮贸易虚拟水的流动状况和趋势, 在此基础上评估主粮贸易对我国水资源压力的影响方向以及影响程度。结果表明, 2009—2019年我国粮食产量和虚拟水消耗量呈上升趋势, 同时虚拟水贸易规模也明显扩大, 对我国水资源压力有缓解作用, 其中大豆的虚拟水贸易影响程度最大。因此, 建议根据粮食作物单位质量含水量不同, 合理规划粮食作物种植结构, 并充分考虑多方面因素的影响后确定进出口规模和结构。

关键词 虚拟水; 主粮贸易; 水资源压力; 可持续性评价; 作物生产

中图分类号 X22 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)04-0069-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.04.019



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Impact of China's Staple Food Trade on Water Resources Pressure from the Perspective of Virtual Water

ZHAO Yi-dan, CHEN Hong (College of Economics and Management, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040)

Abstract The yield of major food crops and the virtual water consumption in production in China from 2009 to 2019 were estimated, and the flow status and trend of virtual water associated with major grain trade were quantitatively analyzed. On this basis, the direction and degree of impact of major grain trade on water resource pressure in China were evaluated. The results showed that China's grain yield and virtual water consumption showed an upward trend during 2009—2019, and the scale of virtual water trade also significantly expanded, which had an alleviating effect on China's water resource pressure, among which soybean virtual water trade had the greatest impact. Therefore, it is suggested that food crop planting structure should be reasonably planned according to different water content per unit mass of food crops, and the scale and structure of import and export should be determined after considering the influence of various factors.

Key words Virtual water; Major grain trade; Water resource pressure; Sustainability evaluation; Food crop production

粮食资源作为关系国计民生的重要物质基础, 对当前社会可持续发展具有重要意义, 同时水资源的利用程度对粮食的生产也起着决定性作用。我国作为人口大国, 未来30年对粮食的需求仍面临不断增加的压力^[1], 《2020年粮食及农业状况》报告中指出, 农业用水占水资源消耗的70%, 因此粮食用水情况将对我国粮食安全、水安全造成重要影响。自1993年Allan等^[2]提出虚拟水概念后, Zimmer等^[3]首先提出虚拟水战略概念, 这一概念使得对水资源的管理不再局限于实体水资源, 同时将粮食的贸易与水的贸易联系起来, 将水资源以粮食贸易的形式在全球范围内进行配置, 为水资源短缺和粮食安全问题的解决提供了新的思路。

现阶段随着虚拟水理论不断发展, 国内外学者利用该理论从不同层面对粮食生产用水进行了研究。在农业发展布局方面, 孙才志等^[4]测算了我国各地区农产品虚拟水总量, 揭示了地均农产品虚拟水差异背后体现的农业集约化空间分异特征规律, 为制定不同类型的农业发展决策提供了相应的理论参考; 李莹等^[5-6]就黑龙江省和新疆地区主要农产品的虚拟水价值和含水量进行了测度。在农业发展中水资源效率评价方面, 郭相等^[7]模拟省区间虚拟水流动格局, 评价虚拟水流动对我国农业用水的影响; 陈红等^[8]测算了黑龙江省2000—2017年14个区域内粮食生产水足迹和灰水足迹, 分析了黑龙江省粮食生产用水绿色效率的时空特征; 贾琨颖等^[9]则将虚拟水净贸易量纳入指标体系, 初步评价了江苏省农业对缺水的脆弱性, 并对降低脆弱性提出了建议; 卓

拉等^[10]重点分析了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。除此之外, 虚拟水理论对区域间农产品贸易也具有指导意义。张雄化^[11]从粮食安全的视角分析了水资源利用效率和虚拟水国际贸易的关系; 杨雪等^[12]在水资源安全视角下研究了我国粮油虚拟水贸易; 韦苏捷等^[13]专注于中国与东盟之间的农产品虚拟水贸易, 而孙才志等^[14]则将视角转向“一带一路”沿线国家, 分析2007—2016年中国与“一带一路”沿线国家农产品贸易虚拟水量的时空变化特征; 同样是以“一带一路”沿线国家为研究区域, 于畅等^[15]分析了原木虚拟水空间流动格局的演变。虚拟水理论同样可以指导国内不同区域间农产品的贸易, 丁雪丽等^[16]从资源、经济、环境3方面出发分析虚拟水流动引发的综合效益; 张启楠等^[17]探讨了我国31个省(市、自治区)虚拟水流动对水资源和区域经济的影响; 韩昕雪琦等^[1]聚焦于我国西北地区, 评估了西北地区农产品贸易输出引发的水资源压力; 而邢莹^[18]则基于粮食净调出省(区)的数据, 通过国内粮食贸易中的虚拟水流动计算出了所产生的生态补偿金额。与其他学者不同, 李新生等^[19]从生产和消费2个角度分析了京津冀地区虚拟水流动特征以及对区域水资源压力的影响。韩雪等^[20]在看到虚拟水贸易优势的同时, 重点关注我国区际间主要农产品虚拟水贸易风险的等级及发生概率。在以上几个研究方向之外, 吴普特等^[21-22]就虚拟水资源统筹管理进行了研究。

当前, 学者们基于虚拟水理论的研究涉及众多领域, 但在农产品虚拟水国际贸易角度的研究大多集中于水资源效率评价以及分析粮食安全和水资源安全, 对于虚拟水贸易对我国水资源压力的缓解作用研究较少。笔者以我国主要粮食作物虚拟水的国际流动为研究对象, 测算2009—2019年

基金项目 黑龙江省哲学社会科学规划项目(21JYB149); 黑龙江省经济社会发展重点研究课题(20209)。

作者简介 赵一丹(2000—), 女, 山西阳泉人, 从事农业环境经济研究。*通信作者, 教授, 博士, 博士生导师, 从事农业环境经济研究。

收稿日期 2021-05-28

小麦、玉米、水稻和大豆4种主要粮食作物虚拟水进出口量,构建水资源压力指数,分析11年间虚拟水进出口变化,对比不同粮食作物间虚拟水差异,进一步得出粮食虚拟水国际贸易对我国水资源压力的缓解作用,并对比虚拟水进出口对我国水资源压力的影响程度,为我国粮食生产以及进出口结构改进提出对策和建议。

1 资料与方法

1.1 数据来源 我国粮食作物产量和作物进出口数据引自2009—2019年的《中国统计年鉴》。单位粮食作物产品虚拟水含量数据引用自孙才志等^[4]计算出的主要农产品单位质量虚拟水含量。2030年全国水资源利用上限引自《全国水资源综合规划(2010—2030)》。

1.2 研究方法

1.2.1 粮食作物国际贸易中虚拟水流动量核算。该研究主要引用孙才志等^[4]计算出的主要农产品单位质量虚拟水含量进行计算。粮食作物产品虚拟水含量计算公式为:

$$D = \frac{W_c}{Y_c} \quad (1)$$

式中, D 为粮食作物C单位质量的虚拟水含量(m^3/t); Y_c 为粮食作物单产(t/hm^2); W_c 为粮食作物C的需水量(m^3/hm^2); $W_c = \text{ET}_c$,即 W_c 近似等于粮食作物实际在生产发育期间累积蒸发蒸腾水量 ET_c 。该研究涉及的小麦、玉米、水稻和大豆4种粮食作物单位质量虚拟水含量分别为1.19、0.86、1.37、2.65 m^3/kg 。

虚拟水流动量计算公式如下:

$$V_i = \sum D_c G_i \quad (2)$$

$$V_e = \sum D_c G_e \quad (3)$$

$$V_n = V_i - V_e \quad (4)$$

式中, V 为我国虚拟水流动量(万 m^3), V_i 为虚拟水进口量, V_e 为虚拟水出口量, V_n 为虚拟水净进口量,当 $V_n > 0$ 时为虚拟水净进口,当 $V_n < 0$ 时为虚拟水净出口; D_c 为第C种粮食作物的单位质量虚拟水含量(m^3/t); G 为我国粮食作物调运量, G_i 为粮食作物进口量, G_e 为粮食作物出口量。

1.2.2 水资源压力指数核算。当前国际上用水资源开发利用程度(water use intensity)来反映一个国家、地区水资源的稀缺程度。该指标定义为年取用的淡水资源量占可获得的(可更新)淡水资源总量的百分率。基于此概念,为了更准确地表征虚拟水流动对我国水资源的影响,在此基础上,引入《全国水资源综合规划(2010—2030)》提出的2030年水资源管理目标之一,即到2030年全国用水总量控制在7 000亿 m^3 以内,提出一种修正后的水资源压力指数(MWSI)。用MWSI量化粮食作物虚拟水的流动对我国水资源短缺程度的影响,计算公式如下:

$$\text{MWSI} = \frac{V}{L_0} \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{MWSI}_f = \frac{W}{L_0} \times 100\% \quad (6)$$

$$P = \frac{\text{MWSI}}{\text{MWSI}_f} \quad (7)$$

式中,MWSI为我国粮食作物进出口引起的水资源压力; V 为伴随粮食作物进出口的虚拟水流动量(万 m^3); L_0 为到2030年全国用水总量上限(万 m^3)。 P 为判断水资源稀缺程度的系数。MWSI_f为粮食作物生产引起的水资源压力; W 为根据生产量和粮食作物产品虚拟水含量推算的生产4种粮食作物用水量(万 m^3)。

为便于比较,将系数进行标准化处理,对于正向指标(数值越大水资源压力越小),水资源进口量和水资源净进口量如下:

$$I = \frac{P_{\max} - P_{ij}}{P_{\max} - P_{\min}} \quad (8)$$

式中, I 为标准化后的压力指数; P_{\max} 、 P_{\min} 分别为压力系数的最大值和最小值; P_{ij} 为压力系数的具体值; i 为指标序列; j 为时间序列,2009—2019年共11年。

对于逆向指标(数值越大水资源压力越大),水资源出口量则有:

$$I = \frac{P_{ij} - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}} \quad (9)$$

根据 I 的指标阈值,将水资源短缺程度分为3个等级,如表1所示。

表1 水资源短缺程度
Table 1 Water shortage degree

标准化压力指数 Normalized pressure index (I)	压力类型 Pressure type	具体特征 Specific characteristic
0~0.2	压力低	水资源与经济环境发展较均衡
>0.2~0.4	压力中等	水资源短缺内可以支持经济发展并能够保证生态需水
>0.4~1.0	压力高	人口与经济发展挤占生态需水,环境日益恶化,水资源危机严重

1.2.3 粮食作物虚拟水流动对水资源利用的影响。粮食作物生产需要大量水资源,粮食作物虚拟水进口对我国水资源节约有重要意义,同时伴随粮食作物出口的虚拟水外流也有一定机会成本。因此使用粮食作物虚拟水流动影响指数反映伴随粮食作物进出口虚拟水流动对我国粮食作物生产使用虚拟水的影响程度。计算公式如下:

$$\text{粮食作物虚拟水流动影响指数} = \frac{\text{进出口粮食作物虚拟水量}}{\text{我国粮食作物生产虚拟水量}} \quad (10)$$

2 结果与分析

2.1 粮食作物产量及生产消耗虚拟水分析 从2009—2019年我国小麦、玉米、水稻、大豆4种粮食作物产量以及生产消耗虚拟水变化趋势(图1)可以看出,小麦、玉米、水稻、大豆4种主要粮食作物产量从2009年的50 429.8万t增加至2019年的62 530.8万t,2009—2019年的年平均产量为58 816.3万t。其中小麦产量从2009年的11 579.6万t增长至2019年的13 359.6万t,增长15.37%。由于小麦产量增长幅度较小,小麦生产消耗虚拟水量仅从2009年的13 779.72万 m^3 增长至2019年的15 897.92万 m^3 。玉米作为

4种粮食作物中单位质量虚拟水含量最少的粮食作物,增长率在4种粮食作物中最高,达到50.51%。2009年玉米的产量为17 325.9万t,2019年增加至26 077.9万t,生产虚拟水消耗也从2009年的14 900.27万 m^3 增加至2019年的22 426.99万 m^3 。与玉米产量增长状况不同,水稻作为4种粮食作物中单位质量虚拟水含量较高的粮食作物,增长率仅为6.84%,在4种粮食作物中产量增幅最小,其产量从2009年的19 619.7万t增加至2019年的20 961.4万t,伴随产量增加虚拟水消耗量从2009年的26 878.99万 m^3 增加至2019年的28 717.12万 m^3 。由于大豆生产耗水量大且生产成本居高不下,我国大豆产量始终保持在较低水平,2009年为1 904.6万t,2019年为2 131.9万t,增长率为11.93%,伴随产量增长的虚拟水消耗量从2009年的5 047.19万 m^3 增加至2019年的5 649.54万 m^3 。伴随这4种粮食作物生产的虚拟水消耗量从2009年的60 606.18万 m^3 增加至2019年的74 411.63万 m^3 ,增幅为22.78%。

2009—2019年4种粮食作物产量及生产消耗虚拟水量均有不同程度的增长。其中,玉米的产量在2011年超过水稻,但由于玉米的单位质量虚拟水含量在4种粮食作物中最少,其虚拟水消耗量虽有较大幅度提升但始终未超过水稻。大豆在4种粮食作物中单位质量虚拟水含量最大,但由于产量少,其虚拟水总消耗量最少,且增幅不大。

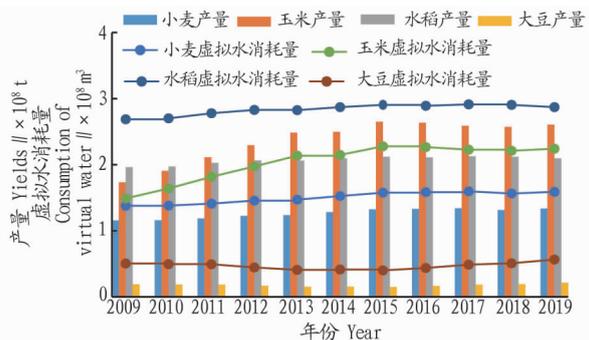


图1 2009—2019年我国主要粮食作物产量和生产消耗虚拟水量

Fig.1 China's main grain yields and production consumption of virtual water from 2009 to 2019

2.2 粮食作物进出口虚拟水流动分析 我国粮食作物进口虚拟水量从2009年的11 439.05万 m^3 增加至2019年的24 613.75万 m^3 ,增幅达到1.15倍。根据我国水资源禀赋以及小麦、玉米、水稻和大豆的单位质量虚拟水含量状况,伴随4种粮食作物进出口虚拟水量差异较大,4种粮食作物进口虚拟水量和出口虚拟水量变化趋势如表2所示。大豆的单位质量虚拟水含量在4种粮食作物中位列第一,且由于我国大豆需求量大、播种面积小、耕作技术不够先进等原因,我国大豆进口量远高于其他3种粮食作物,因此在2009—2019年伴随大豆进口的虚拟水量也始终远高于其他3种粮食作物。玉米的单位质量虚拟水含量在4种粮食作物中最小,因此在2009年伴随其进口的虚拟水量远低于其他3种粮食作物,在2010年后,国际玉米价格明显下降,而国内玉米价格受玉米临储政策影响呈上升趋势,于是玉米进口量有了较大增长,

由此伴随其进口的虚拟水量也与小麦、水稻的虚拟水进口量接近,但大多数年份仍低于其他3种粮食作物。水稻的虚拟水含量比小麦的虚拟水含量略高,但由于我国水稻播种面积大、单位产量高,大多数年份中水稻进口量低于小麦,因此总体上水稻虚拟水流入量小于小麦虚拟水进口量。在2015、2016年水稻进口量略高于小麦,在这2年伴随水稻进口的虚拟水量也略高于小麦。

由于我国水稻生产技术先进、总产量大,我国2009—2019年水稻的出口量在4种粮食作物中始终处于较高水平,因此伴随其出口的虚拟水量也较高,尤其在2017年后,水稻出口量及伴随其出口的虚拟水量有较为明显的提高。玉米的出口量和单位质量虚拟水含量均为4种粮食作物中的最小值,因此在2009—2019年伴随玉米出口的虚拟水量也始终处于最低水平。除2009、2012、2014—2016年外,大豆出口量均小于小麦出口量,但由于大豆单位质量虚拟水含量约为小麦单位质量虚拟水含量的2.23倍,因此在2009—2018年伴随大豆出口的虚拟水量始终高于小麦,在2019年小麦出口量增加,大豆出口量减少,出现小麦出口的虚拟水量高于水稻的情况。总体来说,粮食作物进口量和进口虚拟水量均远高于粮食作物出口量和出口虚拟水量,且粮食作物进口量多少与单位质量虚拟水含量呈正相关,因此2009—2019年我国伴随粮食作物进出口的虚拟水流动基本符合我国资源禀赋状况。

2.3 伴随粮食作物进出口虚拟水流动的水资源压力分析 随着我国粮食作物进出口规模扩大以及进出口结构变化,2009—2019年伴随粮食作物虚拟水流动的水资源压力也发生较大变化,水资源压力总体上呈下降趋势。从要素资源禀赋的角度出发,进口粮食作物可以降低水资源压力,而出口粮食作物则会加大水资源压力,图2显示了不同年份粮食作物进出口虚拟水流动的相对水资源压力,表3反映其对应的水资源压力程度。

伴随粮食作物出口虚拟水流动的水资源压力在2009—2016年呈下降趋势,从2009年高压压力降低至2013—2016年的低压力程度。在2017年后由于粮食作物出口量有较为明显的增长,相对水资源压力也随之增加,2017年增加至中等压力程度,2018、2019年增加至高压压力程度。伴随粮食作物进口和净进口虚拟水流动的相对水资源压力在2009—2019年总体上呈下降趋势,2009—2014年伴随粮食作物进口和净进口虚拟水流动的相对水资源压力为高,2015—2016年下降至中等,2017—2019年为低。2015年粮食作物出口量最小,伴随粮食作物出口虚拟水流动的相对水资源压力也达到最低,2017年粮食作物进口量和净进口量均为最大,因此伴随粮食作物进口虚拟水流动的相对水资源压力达到最低。

虽然2017年后伴随粮食作物出口虚拟水流动的相对水资源压力有较为明显的增长,但由于我国粮食作物出口量远小于粮食作物进口量,其对总体水资源压力影响较小,因此从粮食作物净进口的角度看,2009—2019年我国粮食作物进出口虚拟水流动对我国水资源压力有缓解作用。

表2 2009—2019年伴随粮食作物进口和出口的虚拟水量

Table 2 The virtual water volume associated with the import (a) and export (b) of food crops in 2009

万 m³

年份 Year	进口虚拟水量 Import virtual water volume				出口虚拟水量 Export virtual water volume			
	小麦 Wheat	玉米 Corn	水稻 Rice	大豆 Soybean	小麦 Wheat	玉米 Corn	水稻 Rice	大豆 Soybean
2009	107.10	6.88	49.32	11 275.75	29.16	11.18	108.23	92.75
2010	146.37	135.02	53.43	14 522.00	32.99	11.18	84.94	42.40
2011	149.94	150.50	82.20	13 949.60	39.06	12.04	71.24	55.65
2012	440.30	448.06	324.69	15 470.70	34.02	22.36	38.36	84.80
2013	659.26	281.22	310.99	16 795.70	33.14	6.88	65.76	55.65
2014	357.00	223.60	353.46	18 921.00	20.47	1.72	57.54	55.65
2015	358.19	406.78	463.06	21 647.85	12.73	0.86	39.73	34.45
2016	405.79	272.62	487.72	22 236.15	13.42	3.50	65.76	34.45
2017	525.98	243.38	552.11	25 315.45	21.75	7.39	164.40	29.15
2018	368.90	302.72	421.96	23 330.60	33.97	1.05	286.33	34.45
2019	415.31	411.94	349.35	23 455.15	37.27	2.25	376.75	29.15

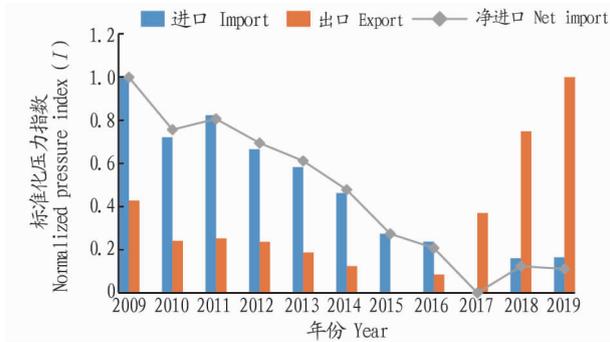


图2 2009—2019年伴随粮食作物虚拟水流动的相对水资源压力

Fig.2 Relative water pressure associated with virtual water flow of food crops from 2009 to 2019

表3 2009—2019年粮食作物进出口水资源压力程度

Table 3 Degree of water resources pressure on import and export of food crops from 2009 to 2019

年份 Year	进口 Import	出口 Export	净进口 Net import
2009	高	高	高
2010	高	中等	高
2011	高	中等	高
2012	高	中等	高
2013	高	低	高
2014	高	低	高
2015	中等	低	中等
2016	中等	低	中等
2017	低	中等	低
2018	低	高	低
2019	低	高	低

2.4 虚拟水流动对水资源压力的影响

从粮食作物虚拟水进口对水资源压力的影响(表4)可以看出,4种粮食作物中大豆的进口量远大于其他3种粮食作物,因此大豆进口对水资源压力的影响大于其他3种粮食作物。大豆虚拟水进口量始终在生产消耗虚拟水量的1倍以上,尤其从2013年开始,大豆国内产量减少,这一数字上升到4倍以上,在2015年由于出口减少进口增加,大豆虚拟水进口量达到生产消耗虚拟水量的5.4倍以上,之后几年虽有下降,但这一数字始终保持在4倍以上。值得注意的是,我国大豆产量始终在减少,虚拟水进口对水资源利用的影响主要由贸易量的变化决定。小麦、玉米生产量变化不大,但进口量增加迅速,因此虚

拟水进口的影响呈波动上升趋势。水稻虚拟水进口的影响总体处于较低水平,呈先上升后下降趋势,这是由于其进口量在2009—2019年先增加后减少。

表4 2009—2019年我国粮食作物虚拟水进口对水资源压力的影响

Table 4 Effect of China's food crop virtual water import on water resource pressure from 2009 to 2019

年份 Year	小麦 Wheat	玉米 Corn	水稻 Rice	大豆 Soybean	%
2009	0.78	0.05	0.18	223.41	
2010	1.06	0.82	0.20	292.77	
2011	1.06	0.83	0.30	282.51	
2012	3.02	2.27	1.15	347.38	
2013	4.48	1.32	1.10	410.92	
2014	2.34	1.04	1.23	456.38	
2015	2.27	1.78	1.59	540.10	
2016	2.56	1.20	1.69	508.33	
2017	3.29	1.09	1.89	518.73	
2018	2.36	1.37	1.45	458.47	
2019	2.61	1.84	1.22	415.17	

从粮食作物虚拟水出口对水资源压力的影响(图3)可以看出,相较于粮食作物进口虚拟水的影响,粮食作物出口虚拟水的影响整体上均处于较低水平。2017年以前,大豆虚拟水进口的影响在4种粮食作物中始终保持在第一位,虽然出口量略高于小麦,但由于其单位质量虚拟水含量最大,所以出口影响很大。水稻从2015年后出口量有较大程度增长,因此其出口影响也迅速增加。小麦和玉米由于单位质量虚拟水含量很小,所以这2种粮食作物出口影响不大,分别始终保持在0.28%和0.12%以下。

从粮食作物虚拟水净进口对水资源压力的影响(表5)可以看出,由于粮食作物进口影响大,出口影响小,净进口虚拟水的影响与虚拟水进口的影响有相同变化趋势。大豆净进口虚拟水的影响远高于其他3种粮食作物,始终在1倍以上,在2013年以后更是保持在4~5倍。小麦和玉米净进口虚拟水的影响也与进口虚拟水影响保持一致。水稻净进口虚拟水的影响与进口虚拟水的影响相比主要变化表现在2017年以后,出现这一现象的主要原因是在2017年以后水稻进口量增加的同时出口量也增加。4种粮食作物总虚拟水净进口的影响呈上升趋势,从2009年的8.32%提升至2019

年的 15.37%，这主要是因为产量保持平稳增长的同时，进口量总体保持较快增长，虽然出口量各种粮食作物表现不一，但由于出口总量少，对总体影响不大。虚拟水净进口对水资源压力的影响最大值出现在 2017 年，2017 年大豆、小麦进口量较大，小麦、玉米出口量继续维持较低水平，大豆出口量大幅降低，水稻出口量虽然有所上升但增幅不大。2011 年虚拟水净进口对水资源压力的影响出现一个低值，主要原因是大豆进口量少，同时小麦出口处于一个较高水平。

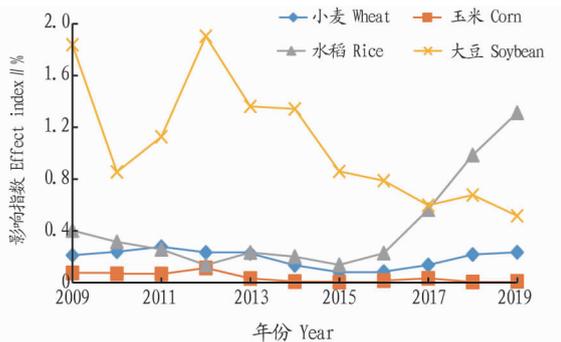


图 3 2009—2019 年我国粮食作物虚拟水出口对水资源压力的影响

Fig.3 Effect of China's food crop virtual water export on water resource pressure from 2009 to 2019

表 5 2009—2019 年我国粮食作物虚拟水净进口对水资源压力的影响
Table 5 Effect of China's food crop virtual water net import on water resource pressure from 2009 to 2019 %

年份 Year	小麦 Wheat	玉米 Corn	水稻 Rice	大豆 Soybean	总量 Total
2009	0.57	-0.03	-0.22	221.57	18.48
2010	0.82	0.75	-0.12	291.91	23.61
2011	0.79	0.76	0.04	281.38	21.77
2012	2.79	2.16	1.01	345.47	24.61
2013	4.26	1.28	0.87	409.56	26.14
2014	2.21	1.03	1.03	455.03	28.33
2015	2.19	1.78	1.46	539.24	31.81
2016	2.48	1.19	1.46	507.54	32.42
2017	3.16	1.06	1.33	518.14	36.55
2018	2.14	1.36	0.47	457.79	33.47
2019	2.38	1.83	-0.10	414.65	33.27

从总体上看，粮食作物虚拟水进口对水资源压力的影响远大于其出口，因此增加粮食作物进口对水资源节约有较大意义。同时因为粮食作物虚拟水出口对水资源压力的影响小，在一定程度上扩大粮食作物出口，可以以较小成本换取较大利益。

3 结论与建议

该研究以虚拟水视角探究粮食作物进出口和虚拟水流动对我国水资源压力的影响，基于虚拟水理论，以水资源压力为落脚点，重点研究 2009—2019 年我国主要粮食作物——小麦、玉米、水稻和大豆的生产与进出口贸易过程，从虚拟水视角分析了伴随主要粮食作物进出口贸易的虚拟水流动情况以及对我国水资源可持续利用造成的水资源压力的影响，并取得以下结论：

(1) 2009—2019 年小麦、玉米、水稻和大豆 4 种粮食作物产量及生产消耗虚拟水量均有增加，但每种粮食作物产量和

生产消耗虚拟水量之间变化趋势并不完全相同。玉米的生产量从 2011 年超过水稻，玉米成为产量最大的粮食作物，小麦和大豆产量则始终位于第三、第四。由于不同粮食作物单位质量虚拟水含量不同，虽然玉米生产消耗的虚拟水量增幅较大，但 4 种粮食作物消耗虚拟水量的排序并未变化，从大到小排序始终为水稻、玉米、小麦、大豆。

(2) 2009—2019 年伴随 4 种粮食作物进出口的虚拟水量均增加，农产品虚拟水贸易规模扩大，进口结构有所优化，出口量波动较大。2019 年我国 4 种粮食作物进口虚拟水量比 2009 年增加 1.15 倍，且进口虚拟水量与 4 种粮食作物单位质量虚拟水含量排序完全一致，符合我国水资源禀赋状况，进口结构有所优化。出口虚拟水量总体上小于进口虚拟水量，且年较差较大，2016 年后水稻出口量明显增加，虚拟水出口结构不符合我国水资源禀赋状况。

(3) 2009—2019 年我国伴随粮食作物进出口的虚拟水流动总体上缓解了我国水资源可持续利用的压力。虚拟水进口带来的水资源压力持续下降，而虚拟水出口的压力则经历了高一低一高的过程。但由于我国粮食作物出口量总体上远小于粮食作物进口量，虚拟水出口压力的增加并未改变虚拟水净进口压力持续降低的趋势。由此判断 2009—2019 年粮食作物虚拟水国际贸易对我国水资源可持续利用压力的缓解有积极作用。从进口和出口虚拟水量对水资源压力的影响来看，虚拟水进口对水资源压力的影响远大于出口，且在 4 种粮食作物中，伴随大豆进口的虚拟水对水资源压力的影响远大于其他 3 种粮食作物，在出口方面，每种粮食作物虚拟水出口对水资源压力的影响差异不大，在 2017 年前大豆出口的影响明显高于其他 3 种粮食作物，但 2017 年后水稻出口对水资源压力的影响超过大豆出口，位列第一。

为更好地利用国内外水资源以缓解本国水资源压力，实现水资源可持续利用，提出以下对策建议：①坚持科技创新和完善管理方式仍是提高水资源利用效率最根本的途径，通过培育更加节水的粮食作物品种、改进生产灌溉设备、提高灾害防范能力以及完善水资源管理模式提高粮食作物单产，降低粮食作物单位质量虚拟水含量，从而从源头实现水资源节约。②根据粮食作物单位质量含水量不同，合理规划粮食作物生产，优化粮食作物进出口结构。我国属于水资源稀缺的国家，根据要素禀赋理论，应该多生产并出口单位质量虚拟水含量低的粮食作物，多进口单位质量虚拟水含量高的粮食作物。同时由于粮食作物虚拟水进口对我国水资源压力影响较大，因此可以充分发挥其节水功能，利用粮食作物虚拟水进口缓解我国水资源压力。而粮食作物虚拟水出口对水资源压力影响较小，则可以更多关注作物出口的经济价值。③统筹规划，合理安排粮食作物进口与出口。由于粮食作物不仅与水资源息息相关，也涉及国家安全、技术创新、国内外环境等因素，因此粮食作物生产与进出口要将市场调节与政府调节统一起来，充分考虑各种因素的影响后确定进出口规模和结构。

2016年夏季与2017年夏季种类更替率(73.33%)显著高于其余相邻年份间种类更替率的现象。众多研究表明,温度、盐度等是影响浮游动物群落结构的重要环境因子^[3,5-6],故2017—2019年夏季环境因子较为稳定从而显示出浮游动物群落也较为稳定。2017—2019年3个年份夏季的差异则更多来自海流水系等的配比情况,舟山及其附近海域夏季受台湾暖流与黑潮的作用较大,同时夏季处于丰水期受到长江冲淡水等沿岸流作用也强烈^[12-13]。

与骆鑫等^[12]于2014年夏季在环舟山本岛海域浮游动物群落调查结果对比,该研究夏季浮游动物种类数、密度、生物量等均略低,这可能是该研究调查的站位数较少导致的,但其优势种在该研究中也是高频率出现的物种,如中华哲水蚤、背针胸刺水蚤、百陶箭虫等。

3.2 调查海域浮游动物群落空间变化特征 调查海域各年度夏季浮游动物种类数、物种组成、密度、生物量以及 Shannon-weaver 多样性指数等存在较显著的空间变化,即排水口海域浮游动物的种类数、密度、生物量总体略高于对照点海域。这可能与夏季不仅受到台湾暖流与黑潮等海流影响,还受到沿岸流作用有关,在沿岸的排水口海域和离岸较远的对照点海域显示出群落的差异性。

另外,根据 Shannon-weaver 多样性指数计算结果评价调查区域生境质量,夏季排水口海域生境多处于一般状态,对照点海域多处于优良状态,这与种类数、密度、生物量等分布情况呈负相关。Shannon-weaver 多样性指数(H')是一个描述群落多样性的综合统计量,也可以判定受人为扰动情况,当 H' 指数较高人为扰动较小,当 H' 指数低时则扰动较

大^[14]。排水口海域受到电厂温排水增温等的影响较大,人为扰动大 H' 指数较低,而对照点海域人为影响较小,故 H' 指数相对较高。

参考文献

- [1] 徐晓群,杜萍,寿鹿,等.长期温排水影响下的象山港浮游动物群落分布和季节变化[C]//第七届长三角科技论坛——环境保护与生态文明分论坛论文集.杭州:浙江省科协,浙江省环境科学学会,浙江省生态学会,2010:48-61.
- [2] 董开兴.飞云江口外水域和苍南近岸水域浮游动物生态特征比较[D].厦门:厦门大学,2015.
- [3] 杜明敏,刘镇盛,王春生,等.中国近海浮游动物群落结构及季节变化[J].生态学报,2013,33(17):5407-5418.
- [4] LAMPERT W. The relationship between zooplankton biomass and grazing: A review[J]. *Limnologica*, 1988, 19: 11-20.
- [5] 沈海琪,许永久,王健鑫,等.2017—2018年长江口海域夏季浮游动物群落的年际变化及影响因素[J].中国水产科学,2020,27(3):327-335.
- [6] 杨璐,刘捷,张健,等.渤海湾浮游动物群落变化及其与环境因子的关系[J].海洋学研究,2018,36(1):93-101.
- [7] 杨杰青,全为民,史赞荣,等.东海近岸海域浮游动物群落时空分布[J].水产学报,2018,42(7):1060-1076.
- [8] 卢伍阳,马增岭,徐兆礼,等.春季我国不同纬度河口浮游动物群落变化趋势[J].海洋学报,2016,38(10):83-93.
- [9] 王亮根,李亚芳,杜飞雁,等.大亚湾人工鱼礁区和岛礁区浮游动物群落特征及对仔稚鱼的影响[J].南方水产科学,2018,14(2):41-50.
- [10] 傅强,朱礼鑫,沈益绿,等.滨海电厂温排水对临近海域浮游动物生态特征的影响研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2015,45(7):25-33.
- [11] 刘耀谦.湛江钢铁自备电厂附近海域 pH、水温与重金属和浮游动物群落的耦合关系[D].湛江:广东海洋大学,2016.
- [12] 骆鑫,曾江宇,徐晓群,等.舟山海域夏、秋季浮游动物的分布特征及其与环境因子的关系[J].生态学报,2016,36(24):8194-8204.
- [13] 沈国英,施并章.海洋生态学[M].2版.北京:科学出版社,2002:37-39.
- [14] WILHM J L. Use of biomass units in shannon's formula[J]. *Ecology*, 1968, 49(1):153-156.
- [10] 卓拉,栗萌,吴普特,等.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[J].水利学报,2020,51(9):1059-1069.
- [11] 张雄化.水资源利用效率与虚拟水国际贸易关系分析:基于粮食安全的视角[J].云南社会科学,2015(1):66-70.
- [12] 杨雪,何玉成,刘成.水资源安全视角下我国粮油虚拟水贸易实证研究[J].中国农业资源与区划,2021,42(1):41-50.
- [13] 韦苏捷,贺培.中国—东盟农产品虚拟水贸易分析及启示[J].国际贸易,2015(12):36-42.
- [14] 孙才志,王中慧.中国“一带一路”沿线国家农产品贸易的虚拟水量流动特征[J].水资源保护,2019,35(1):14-19,26.
- [15] 于畅,岳丹萌,官梦蝶,等.“一带一路”沿线国家原木水足迹核算及空间流动格局研究[J].林业经济,2020,42(10):16-27.
- [16] 丁雪丽,张玲玲,王宗志.基于省际间粮食贸易的虚拟水综合效益分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(5):978-987.
- [17] 张启楠,张凡凡,李福夺,等.粮食虚拟水流动对水资源和区域经济的影响研究[J].中国农业资源与区划,2018,39(7):21-28.
- [18] 邢莹.中国省际粮食贸易中的虚拟水生态补偿:基于粮食净调出省(区)数据[J].江苏农业科学,2016,44(1):467-468.
- [19] 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.
- [20] 韩雪,梁璇,王倩.中国主要农产品虚拟要素贸易网络结构特征分析[J].生态学报,2020,40(11):3851-3865.
- [21] 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.
- [22] 蔡婕萍,左高山,许和连.虚拟水:国际水资源管理与启示[J].生态经济,2019,35(10):200-206,223.

(上接第73页)

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. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible[C]//ODA. Priorities for water resources allocation and management. Londra: ODA, 1993:13-26.
- [3] ZIMMER D, RENAULT D. Virtual water in food production and global trade: Review of methodological issues and preliminary results[C]//HOEKSTRA A Y. Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade. Delft, Netherlands: UN ESCO/HE Inst for Water Educ, 2003:93-107.
- [4] 孙才志,张蕾.中国农产品虚拟水—耕地资源区域时空差异演变[J].资源科学,2009,31(1):84-93.
- [5] 李莹,毛世峰,张勇.基于虚拟水理论的黑龙省主要农产品虚拟水价值研究[J].安徽农业科学,2016,44(19):244-247.
- [6] 方芳,马琼.新疆2002—2016年主要农作物虚拟水含量时空分布分析[J].中国农村水利水电,2019(8):36-41.
- [7] 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.
- [8] 陈红,王浩坤,秦帅.水足迹视角下黑龙江粮食生产用水绿色效率研究:基于三阶段 SBM-Malmquist 指数分析法[J].长江流域资源与环境,2020,29(12):2790-2804.
- [9] 贾琨颖,田贵良.虚拟水下区域农业对水资源短缺的脆弱性研究[J].节水灌溉,2017(8):53-57.