

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.027

我国粮食虚拟水流动对水资源和区域经济的影响*

王玉宝¹ 吴普特^{1,2} 孙世坤^{1,2} 操信春^{1,2} 刘 静^{1,2}

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 虚拟水流动是虚拟水形态的水资源在地理空间上的再分配,对区域经济和水资源具有重要影响。以省级行政区为单元,计算了2010年我国粮食生产、消费、调运及生产用水和虚拟水流动情况;选取节水量、水资源压力指数和人均国内生产总值3个指标,定量研究了我国区域间粮食虚拟水流动对区域经济和水资源的影响。结果表明:我国省级行政区之间粮食虚拟水流动量为1 138.1亿m³,其中蓝水为449.7亿m³,流动的主要规律是从水资源效率高的地区流向效率低的地区,从缺水地区流向丰水地区,从经济欠发达的地区流向经济相对发达的地区。相应地,在国家尺度上,省级行政区之间的粮食虚拟水流动节水578.9亿m³,其中蓝水为478.9亿m³;粮食虚拟水输出使输出省级行政区水资源压力指数由1.61(假设输出区粮食虚拟水输出为0)上升到2.04;人均GDP由43 428元(假设生产调出粮食的水量全部转变为工业用水)减少到31 776元。提高农业用水效率,实施虚拟水补偿,优化作物种植结构是解决我国区域虚拟水流动负面效应的关键措施。

关键词: 虚拟水 粮食 水资源 节水 水资源压力 区域经济 中国

中图分类号: TV213.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)10-0208-08

Impact of Virtual Water Flows of Grain on Water Resources
and Regional Economy in China

Wang Yubao¹ Wu Pute^{1,2} Sun Shikun^{1,2} Cao Xinchun^{1,2} Liu Jing^{1,2}

(1. Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area, Ministry of Education,
Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Regions of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The virtual water flows could be seen as the spatial redistribution of water resources in virtual form, which have a significant influence on regional economy and water resources. The production, consumption, transfer of grain crops, water use and virtual water flows were calculated for different provinces of China in 2010. Then the effects of regional grain virtual water flows on regional economy and water resources were demonstrated by using water saving amount, water stress index and GDP per capita. The results showed that the volume of grain virtual water flows between different provinces of China was 113.81 Gm³ and the blue water was 44.97 Gm³. Most of the flows were from regions with relatively high water use efficiency to those with relatively low water use efficiency regions, from water-shortage regions to water-rich regions, from regions with low economic level to those with high economic level regions. As a result, about 57.89 Gm³ of water resources were saved due to regional grain virtual water flows and the value for blue water was 47.89 Gm³, the water stress index increased from 1.61 to 2.04 assuming the virtual water export was zero, and the GDP per capita decreased from 43 428 Yuan to 31 776 Yuan assuming that all of water resources used to produce the exported grain crops could be used for industrial

收稿日期: 2015-06-09 修回日期: 2015-07-13

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B09)

作者简介: 王玉宝, 副研究员, 博士, 主要从事农业水土资源管理研究, E-mail: wyb0406@sina.com

通讯作者: 吴普特, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业水土资源高效利用研究, E-mail: gjzwpt@vip.sina.com

production. The improvement of agricultural water use efficiency, the compensation for virtual water flows and the optimization of cropping pattern could be measures with great significance to alleviate the negative effects caused by regional virtual water flows of China.

Key words: Virtual water Grain Water resources Water savings Water resources stress Regional economic China

引言

商品贸易引起的虚拟水流动是虚拟水形态的水资源在地理空间上的再分配过程^[1-2]。粮食生产作为高耗水低经济收益的生产环节,对水资源和区域经济具有重要影响^[3-4]。作为一种水密集型商品,粮食的输入缓解了虚拟水输入区的水资源压力,但却增加了输出区的水资源压力和生态压力^[5-7]。当虚拟水流动方向是从虚拟水含量低的地区向高的地区流动,则在全球尺度上,具有一定的节水作用,反之,则会浪费一定的水资源^[4-5]。水作为一种战略性经济资源,粮食虚拟水流动也对区域经济造成深远影响。

自 1978 年改革开放以来,我国粮食生产不断向经济欠发达的中西部地区和缺水的北方地区转移和集中^[8];自 1990 年开始我国从传统的南粮北运转变为北粮南运,且调运量呈不断上升的趋势^[9]。虚拟水概念提出后,我国区域间粮食虚拟水流动格局及其造成的影响已引起国内外一些学者的关注^[10-15]。我国区域间粮食虚拟水流动在国家尺度上的节水量已有一定的研究^[4, 16];但对粮食虚拟水流动引起的水资源压力变化研究较少^[4, 17],且仅限于定性探讨;针对粮食虚拟水流动引起的区域经济影响尚未见报导。本文选取了节水量、水资源压力指数和人均 GDP(国内生产总值)3 个指标,定量研究我国粮食虚拟水流动对区域经济和水资源的影响,并由此提出降低粮食虚拟水流动负面效应,缓解区域水资源压力和生态压力,协调区域经济发展的措施。

1 数据与方法

1.1 数据

文中的粮食是谷物、豆类和薯类的统称。全国主要气象站点降水量数据引自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/index.jsp>)。农业数据如粮食产量、耕地面积、播种面积及人口数据等参考文献[18-19]。农业用水相关数据参考文献[20-21]。

1.2 方法

1.2.1 研究区域划分

本文所研究的省级行政区指中国大陆 31 个省

级行政区,香港、澳门特别行政区及台湾省未进行研究,如图 1 所示。东部、中部和西部分别包括 10、10、11 个省级行政区,北方和南方各包括 15、16 个省级行政区^[10, 22]。

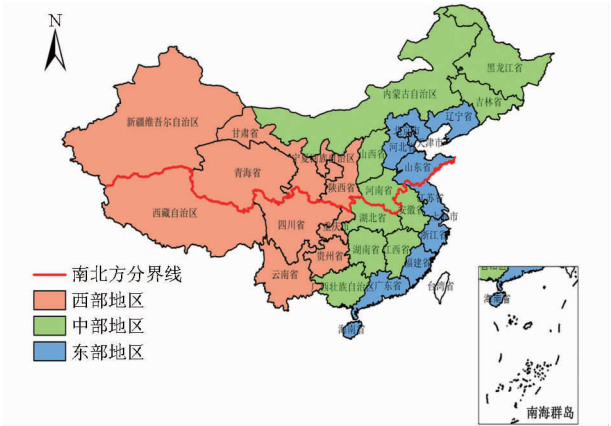


图 1 研究区域划分
Fig. 1 Location of study area

1.2.2 区域粮食虚拟水流动计算

由于缺乏粮食储存与区域间贸易数据,粮食虚拟水流动的计算需要基于 3 个假设:①粮食储量不变原则,即当年生产的粮食全部为当年消费。②社会公平性原则,认为各区域人均粮食消费量相同。③外部不干扰原则,即区域粮食虚拟水流动不受粮食进出口的影响^[4, 11]。

各省级行政区粮食虚拟水流动计算方法为

$$V_{WFj} = \Delta A_j^{gt} V_{WCi} \tag{1}$$

其中 $\Delta A_j^{gt} = G_j - P_j G_N / P_N \tag{2}$

$$V_{WCi} = \begin{cases} V_{WCj} & (\Delta A_j^{gt} \geq 0) \\ \sum_{j=1}^n \Delta A_{oj}^t V_{WCj} & (\Delta A_j^{gt} < 0) \end{cases} \tag{3}$$

$$V_{WCj} = V_{Wj} / G_j \tag{4}$$

$$V_{Wj} = G_{VWj} + B_{VWj} \tag{5}$$

式中 V_{WFj} ——第 j 省级行政区粮食虚拟水流动,正、负值分别表示虚拟水的输出和输入, m^3

ΔA_j^{gt} ——第 j 省级行政区粮食净输入输出量,正、负值分别表示粮食的输出和输入, kg

V_{WCi} ——粮食虚拟水含量, m^3/kg

G_j ——第 j 省级行政区粮食产量, kg

P_j ——第 j 省级行政区人口数量(常住人口)
 G_N ——我国粮食总产量, kg
 P_N ——我国人口总量
 ΔA_{oj}^t ——第 j 省级行政区粮食输出量, kg
 V_{WCj} ——第 j 省级行政区粮食虚拟水含量, m^3/kg
 n ——向第 j 省级行政区输入粮食的省级行政区个数
 V_{Wj} ——第 j 省级行政区粮食生产中蓝水(灌溉水)和绿水(降水)利用量, m^3
 G_{VWj} ——第 j 省级行政区绿水利用量, 它等于作物生育期内有效降水量与粮食作物播种面积的乘积, m^3
 B_{VWj} ——第 j 省级行政区粮食生产中的灌溉水量, m^3

有效降水量按各省级行政区内各气象站点的算术平均值计算, 各站点有效降水量 P_{ei} 采用美国农业部土壤保持局推荐、当前得到公认和普遍推荐的方法计算, 其计算公式^[3, 23-24]为

$$P_{ei} = \begin{cases} P_i(4.17 - 0.02P_i)/4.17 & (P_i < 83) \\ 41.7 + 0.1P_i & (P_i \geq 83) \end{cases} \quad (6)$$

式中 P_{ei} ——作物 i 生育期内的有效降水量, mm
 P_i ——作物 i 生育期内对应的旬降水量, mm

各区域粮食虚拟水流动量为该区域各省级行政区的粮食虚拟水流动量的加和。

1.2.3 区域粮食虚拟水流动在国家尺度上的节水量计算

各省级行政区之间虚拟水流动在国家尺度上的节水量的计算式为

$$Q_{Wj} = \Delta A_j^{gt} (V_{WCja} - V_{WCpj}) \quad (7)$$

其中
$$V_{WCja} = \sum_{i=1}^n V_{WCri} \Delta A_{ri}^t \quad (8)$$

式中 Q_{Wj} ——第 j 省级行政区因粮食调运在国家尺度上的节水量, 正、负值分别表示节水和浪费水, m^3

V_{WCpj} ——第 j 省级行政区粮食虚拟水含量, m^3/kg
 V_{WCja} ——调运部分的粮食虚拟水含量, m^3/kg
 V_{WCri} ——从省级行政区 i 调运到 j 的粮食虚拟水含量, m^3/kg
 ΔA_{ri}^t ——从省级行政区 i 到 j 的粮食调运量, kg

各区域之间虚拟水流动在国家尺度上的节水量为该区域各省级行政区的节水量加和。

1.2.4 水资源压力指数的计算

水资源压力指数反映蓝水资源的缺乏程度, 它

仅考虑蓝水。对任一省级行政区, 水资源压力指数的计算方法^[25]为

$$I_{Wsj} = (W_{tj} - W_{trj} - W_{itj}) / (W_{Aj} \times 20\%) \quad (9)$$

式中 I_{Wsj} ——第 j 省级行政区水资源压力指数, 无量纲

W_{tj} ——第 j 省级行政区水资源开发利用总量, m^3

W_{trj} ——第 j 省级行政区过境水利用量, m^3

W_{itj} ——第 j 省级行政区跨流域调入水量, m^3

W_{Aj} ——第 j 省级行政区可利用水资源量, m^3

任一区域的水资源压力指数按该区域各省级行政区的国土面积加权后进行计算。

水资源压力分级参照文献[25-27]划分: 低水资源压力(水资源压力指数 $I_{WS} < 1.0$)、中等水资源压力($I_{WS} = 1.0 \sim 1.5$)、高水资源压力($I_{WS} = 1.5 \sim 2.0$)和严重水资源压力($I_{WS} > 2.0$)。

2 结果与分析

2.1 粮食生产、消费、调运及用水和虚拟水流动状况

2.1.1 区域粮食生产及调运特征

2010 年我国区域间粮食产量差异显著(表 1)。河南产量最大, 西藏产量最小, 最大值为最小值的 60 倍。产量最高的前 7 个省级行政区为河南、黑龙江、山东、江苏、四川、安徽和河北, 生产了全国约 50% 的粮食。东部、中部和西部粮食产量分别占全国粮食总产量的 51.5%、28.6% 和 19.9%, 粮食产量分别较 1978 年增加 29.3%、107.1% 和 62.5%, 较 1990 年中、西部地区分别增加 38.3% 和 21.6%, 而东部产量下降了 1.3%。表明我国粮食生产不断向中西部地区转移和集中。北方粮食产量约为南方的 1.2 倍, 对比 1978 年, 南方和北方粮食产量分别增加 31.4% 和 123.3%, 对比 1990 年, 南方粮食产量仅增加 0.1%, 而北方增加 47.2%。表明我国粮食生产逐渐向北方转移和集中。

2010 年我国省级行政区之间粮食调运比例(粮食调运量/粮食总产量)为 17.6%, 粮食调出量最多的省级行政区是黑龙江, 约占所有调出省级行政区调出总量的 35.7%, 粮食调出比例(粮食净调出量/粮食总产量)达到 68.7%, 调出量最多的前 4 个省级行政区分别为黑龙江、内蒙古、河南和吉林, 调出总量占有调出省级行政区调出总量的 81.9%。粮食调入量最多的省级行政区是广东, 约占所有调入省级行政区调入总量的 30.7%, 调入量最多的前 5 个省级行政区分别为广东、浙江、福建、上海和北京, 调入总量占有调入省级行政区调入总量的 70.5%, 其中粮食调入比例(粮食净调入量/粮食总

表 1 我国粮食生产、消费、调运及用水和虚拟水流动状况

Tab.1 Grain production, consumption, transportation, and water used for grain production and virtual water flows in China

区域	粮食产量/ 亿 kg	粮食 消费量/ 亿 kg	粮食 调运量/ 亿 kg	虚拟 水含量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	虚拟 蓝水含量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	用水总量/ 亿 m^3	蓝水用量/ 亿 m^3	虚拟 水流量/ 亿 m^3	虚拟蓝水 流量/ 亿 m^3
北京	11.6	80.4	-68.8	1.00	0.43	11.5	5.0	-81.3	-32.1
天津	16.0	53.1	-37.1	1.09	0.54	17.5	8.7	-43.8	-17.3
山西	108.5	146.4	-37.9	1.06	0.32	115.4	34.3	-44.8	-17.7
内蒙古	215.8	101.3	114.5	1.08	0.57	233.3	123.2	123.8	65.4
辽宁	176.5	179.4	-2.8	1.37	0.46	241.1	81.7	-3.4	-1.3
吉林	284.3	112.6	171.7	1.10	0.33	312.3	93.9	188.6	56.7
黑龙江	501.3	157.1	344.2	1.40	0.53	701.5	266.1	481.7	182.7
河北	297.6	294.6	3.0	0.96	0.38	285.7	113.0	2.9	1.1
河南	543.7	385.5	158.2	0.75	0.19	409.6	100.8	119.2	29.3
山东	433.6	392.8	40.8	0.75	0.25	326.3	108.4	30.7	10.2
安徽	308.0	244.0	64.1	1.28	0.46	395.3	140.4	82.2	29.2
陕西	116.5	153.1	-36.6	1.34	0.39	155.8	45.2	-43.2	-17.1
甘肃	95.8	104.9	-9.1	1.13	0.80	108.2	76.9	-10.7	-4.2
青海	10.2	23.1	-12.9	1.87	1.15	19.0	11.7	-15.2	-6.0
宁夏	35.7	25.8	9.8	1.93	1.53	68.7	54.6	18.9	15.0
新疆	117.1	89.4	27.6	1.87	1.55	218.8	180.9	51.7	42.7
上海	11.8	94.4	-82.5	1.54	0.96	18.2	11.4	-97.6	-38.5
浙江	77.1	223.2	-146.1	1.63	0.92	125.9	71.1	-172.7	-68.2
福建	66.2	151.3	-85.1	1.51	0.80	99.8	53.0	-100.5	-39.7
江苏	323.5	322.5	1.0	1.37	0.75	444.2	241.2	1.3	0.7
湖北	231.6	234.7	-3.1	1.27	0.44	294.7	102.4	-3.7	-1.5
湖南	284.7	269.3	15.4	1.28	0.54	364.5	154.8	19.8	8.4
江西	195.5	182.7	12.7	1.36	0.64	266.5	125.3	17.3	8.2
广东	131.6	427.7	-296.0	2.38	1.42	313.3	187.5	-349.8	-138.2
广西	141.2	188.7	-47.5	2.09	1.26	295.5	178.3	-56.1	-22.2
海南	18.0	35.5	-17.5	2.37	1.42	42.8	25.6	-20.7	-8.2
重庆	115.6	118.3	-2.7	0.90	0.20	104.3	22.9	-3.2	-1.3
四川	322.3	329.7	-7.5	1.00	0.36	321.2	116.7	-8.8	-3.5
贵州	111.2	142.5	-31.3	1.59	0.41	176.6	45.4	-36.9	-14.6
云南	153.1	188.5	-35.4	2.00	0.51	306.8	77.8	-41.8	-16.5
西藏	9.1	12.3	-3.2	2.03	1.50	18.5	13.7	-3.8	-1.5
标准差	146.3	113.3		0.5	0.4	159.3	68.6		
变异系数	0.8	0.6		0.3	0.6	0.7	0.7		
全国	5 464.8	5 464.8	0	1.25	0.53	6 813.0	2 871.8	0	0
东部	1 563.5	2 254.8	-691.3	1.23	0.58	1 926.4	906.6	-834.9	-331.6
中部	2 814.6	2 022.4	792.3	1.20	0.47	3 388.8	1 319.3	927.9	338.5
西部	1 086.6	1 187.6	-101.0	1.38	0.59	1 497.8	645.8	-93.1	-6.9
北方	2 964.0	2 299.4	664.6	1.09	0.44	3 224.6	1 304.4	774.9	307.4
南方	2 500.7	3 165.3	-664.6	1.43	0.63	3 588.4	1 567.4	-774.9	-307.4

注:粮食调运量和虚拟水流量为正时表示该区域为粮食或虚拟水输出区,为负时表示该区域为粮食或虚拟水输入区。

消费量)最高的为上海,达到 87.5%。由此可以得出,粮食调出量多的省级行政区均位于中西部,且属于北方,而调入量多的省级行政区均位于东部,且属于南方。中部为粮食调出区,粮食调出比例为 28.2%;东部和西部为粮食调入区,但东部所占比例较大,占 87.2%,东部粮食调入比例为 30.7%,西部为 8.5%。北方为粮食调出区,调出比例为 22.4%;南方为粮食调入区,粮食调入比例为 21.0%。

2.1.2 区域粮食生产用水及虚拟水流动特征

2010 年我国粮食生产蓝水用量约为我国总蓝水用量的 47.9%。粮食虚拟水含量为 1.25 m^3/kg ,其中 42.2% 是蓝水。区域间粮食虚拟蓝水含量较

粮食虚拟水含量差异更为显著。虚拟水含量最高的广东是最低的河南和山东的 3.2 倍,虚拟蓝水含量最高的新疆是最低的河南的 8.3 倍。蓝水比例(蓝水利用量/蓝水和绿水总利用量)最高的是新疆,达到 82.7%,最低的是重庆,为 22.0%。中部的虚拟水含量和蓝水比例低于东部和西部,北方的虚拟水含量和蓝水比例低于南方,表明粮食调出区有更高的水分利用效率和较低的蓝水比例。

我国输出区粮食虚拟水输出量占粮食生产蓝水用量的 51.8%,输入区粮食虚拟水输入量占粮食虚拟蓝水总消费量(区域所消费粮食包含的全部虚拟水量)的 57.2%。虚拟水输出省级行政区共有 12 个,其中 7 个位于中部,8 个属于北方。黑龙江和广东分别是最大的虚拟水输出区和输入区。中部为虚拟水输出区,东部和西部是虚拟水输入区,但东部虚拟水输入量约为西部的 9 倍,其中虚拟蓝水输入量是西部的 48 倍。北方为粮食虚拟水输出区,南方为虚拟水输入区。

综上,随着我国粮食生产不断向中西部 and 北方转移和集中,粮食及内嵌于粮食的虚拟水呈从经济欠发达的中西部向经济相对发达的东部和由缺水的北方向丰水的南方输出的态势。

2.2 国家尺度上粮食虚拟水流动引起的节水量

我国输出区的粮食虚拟水含量按各省级行政区的粮食产量加权平均为 1.14 m³/kg,其中蓝水为 0.48 m³/kg;输入区粮食虚拟水含量为 1.45 m³/kg,其中蓝水为 0.61 m³/kg。输出区用水效率高于输入

区,因此,在国家尺度上,粮食虚拟水流动能产生节水的效果。如图 2 所示,在国家尺度上,2010 年我国省级行政区之间粮食虚拟水流动引起的节水量为 578.9 亿 m³,节水率(节水量/水资源利用量)为 8.5%,其中节约蓝水量 478.9 亿 m³,节水率为 16.7%。蓝水节约量是绿水节约量的 4.8 倍,而我国粮食生产绿水消耗高于蓝水,表明粮食虚拟水输出省级行政区较输入的省级行政区蓝水比例普遍较低。粮食虚拟水从蓝水利用比例高的地区向利用比例低的地区流动,即以消耗较多的绿水来节约机会成本更高的蓝水,对于减缓区域水资源压力,促进区域可持续发展具有重要意义^[28-29]。中部向东部输出粮食虚拟水的节水量为 19.4 亿 m³,节约蓝水量为 76.7 亿 m³。节约的蓝水量超过节约的总水量,说明绿水不但未节约,反而消耗得更多。其原因是尽管东部相对中部降水量大,但由于种植结构的差异,中部粮食作物中玉米产量比例较大,东部水稻产量比例较大,而玉米虚拟水含量和蓝水比例通常低于水稻,故生产单位粮食所需要的广义水资源量和蓝水量中部少于东部,而绿水量中部多于东部,进而造成中部向东部输出粮食虚拟水产生蓝水节约而以绿水多消耗为代价。中部向西部输出粮食虚拟水节水量为 17.6 亿 m³,节约蓝水量为 12.6 亿 m³。西部较东部从中部调入的粮食量少,而节水量相近,说明东部和中部粮食虚拟水含量差异较小,而西部和东部差异较大。北方向南方输出虚拟水,节水量为 230.6 亿 m³,其中节约蓝水量 124.3 亿 m³。

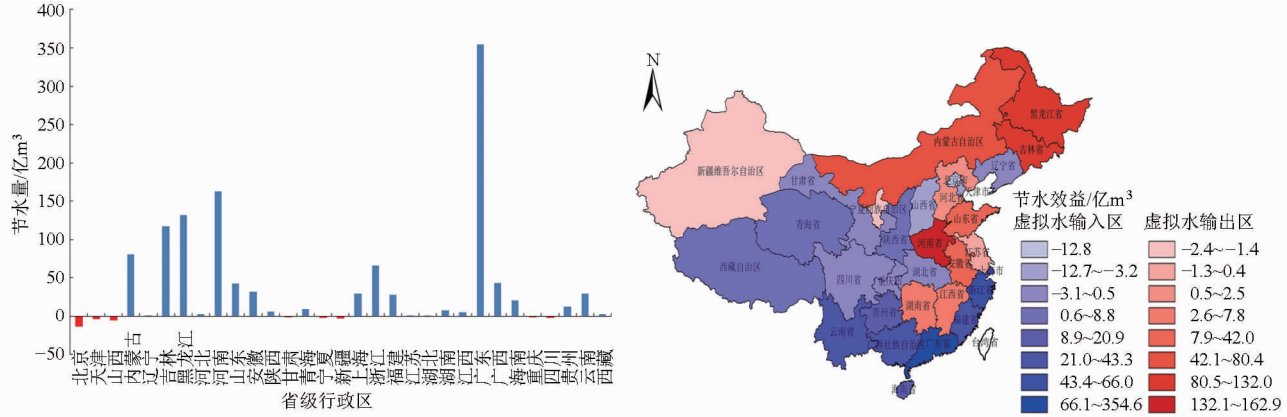


图 2 国家尺度上粮食虚拟水流动引起的节水量
Fig. 2 Water savings by virtual water flows of grain on national scale

2.3 粮食虚拟水流动对水资源压力的影响

我国水资源压力指数(I_{ws})为 1.34(按各省级行政区国土面积加权平均),处于中等水资源压力水平。粮食输出区 I_{ws} 为 2.04,属于严重水资源压力水平,输出区粮食虚拟水输出对区域水资源压力的贡献率(区域粮食虚拟蓝水输出量占区域蓝水利

用总量的百分比)为 13.7%。输入区 I_{ws} 为 0.67,属于低水资源压力水平,输入区粮食虚拟水输入对区域水资源压力的贡献率(区域粮食调入减少的水资源利用量占区域蓝水利用总量的百分比)为 33.9%。输出区水资源压力远大于输入区,给输出区带来了严重的水资源压力和生态压力,也给我国

粮食安全带来隐患。如图 3 所示,我国省级行政区之间 I_{ws} 差异显著,变异系数达到 0.93。华北和西北地区大部分省级行政区的 I_{ws} 较高,西南地区的省级行政区 I_{ws} 均较低。其中河北 I_{ws} 最高,是最低的西藏的 161 倍。中部 I_{ws} 低于东部但高于西部,故从总体而言,中部向东部输出粮食虚拟水有利于降低水资源压力。北方 I_{ws} 为 1.90,南方 I_{ws} 为 0.48,北方 I_{ws} 远高于南方,北方向南方输出粮食虚拟水,增加了北方水资源压力。

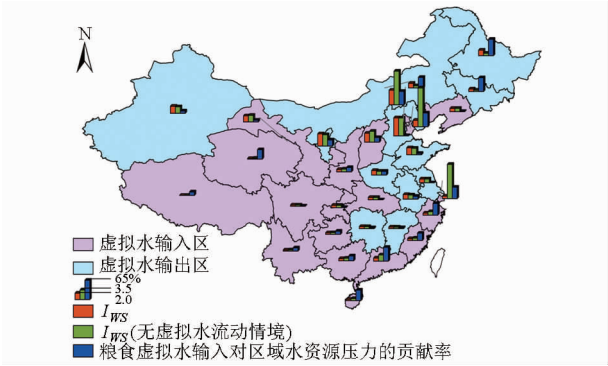


图 3 粮食虚拟水流动对水资源压力的影响
Fig. 3 Impact of virtual water flows of grain on water stress in China

假设无虚拟水流动情况下,即各省级行政区根据本区域消费的需要进行粮食生产,达到生产与消费的平衡。粮食输出省级行政区可以减少用于生产调出粮食所需要的水资源量,而粮食输入省级行政区需要增加用于生产调入粮食所需要的水资源量。则我国水资源压力总体为 1.23,下降 8.4%,表明粮食虚拟水输出总体上加剧了我国的水资源压力。输出区 I_{ws} 可以下降到 1.61,下降了 21%,从严重水资源压力水平降为高水资源压力水平。输入区 I_{ws} 上升到 0.86,上升了 28%,仍处于低水资源压力水平。省级行政区之间 I_{ws} 差异加大,变异系数上升到 1.42。主要原因是北京、上海和天津 3 个直辖市由于粮食调入比例很大,在无虚拟水流动的情况下, I_{ws} 上升到 10 以上,省级行政区之间标准差系数从 1.42 上升到 3.46 所致。中部 I_{ws} 从 1.38 下降到 0.88,水资源压力从中等水资源压力转变为低水资源压力水平。东部 I_{ws} 从 2.17 上升到 2.66,西部 I_{ws} 从 1.12 下降到 1.09。西部尽管整体上是粮食虚拟水输入区,但粮食虚拟水的输入并未使得 I_{ws} 下降,反而有一定的上升。其主要原因是作为粮食虚拟水输出的新疆和宁夏, I_{ws} 较大,属于严重水资源压力地区,且新疆国土面积很大,而作为虚拟水输入区的西南各省级行政区, I_{ws} 都比较小。北方 I_{ws} 可下降到 1.65,下降 13%,南方 I_{ws} 上升到 0.58,上升 21%。北方向南方输出粮食虚拟水,加剧了北方水

资源压力。

2.4 粮食虚拟水流动对区域经

济的影响

用水结构(不同产业之间的蓝水利用比例)对区域经济发展具有重要影响。我国粮食输出区多为第一产业比重大、经济欠发达的地区。在区域可利用水资源有限的情况下,粮食输出区很可能会调整用水结构,降低第一产业用水比例,将高耗水低收益的粮食生产用水转变为高收益的工业用水,以发展区域经

济,缩减与发达地区的经济差距。故粮食虚拟水流动间接影响用水结构,会给我国粮食安全带来隐患。

2010 年我国人均 GDP 为 32 792 元。粮食输出区人均 GDP 为 31 776 元,低于粮食输入区的 33 698 元。输出区人均 GDP 低于输入区,不利于区域经济的协调发展。如图 4 所示,我国省级行政区之间人均 GDP 差异显著,变异系数达到 0.52。上海、北京和天津 3 个直辖市人均 GDP 最高,均超过 7 万元,贵州、云南、甘肃和西藏最低,均低于 2 万元。东部、中部和西部人均 GDP 分别为 45 551 元、25 624 元和 20 773 元,东部人均 GDP 高于中部和西部,分别是二者的 1.8 倍和 2.2 倍,因此中西部向东部输出粮食虚拟水,进一步加大了我国区域间经济差距,给我国粮食安全带来了隐患。北方和南方人均 GDP 分别为 33 360 元和 32 379 元,北方人均 GDP 略高于南方 3.0%。



图 4 粮食虚拟水流动对区域经
Fig. 4 Impact of virtual water flows of grain on regional economy in China

济

假设粮食虚拟水输出区为发展经济仅生产供自己区域所需的粮食,不再有粮食虚拟水输出,减少的粮食生产用水全部用于工业生产,则输出区人均 GDP 将有一定的增长。而对于粮食虚拟水输入区,因农业用水处于弱势,很难将其他产业用水转变为农业用水,故这里不再调整输入区的 GDP。调整后,我国人均 GDP 达到 38 388 元,上升 16.8%,表明在现有条件下,改善粮食虚拟水输出区用水结构,

有益于区域经济的发展。输出区人均 GDP 增加到 43 428 元,远超过虚拟水输入区,提高了 36.7%。如图 4 所示,省级行政区之间人均 GDP 差异略有增大,变异系数上升到 0.60。东部、中部和西部人均 GDP 分别为 47 082 元、36 178 元和 25 184 元,东部人均 GDP 仍然最高,分别是中部和西部的 1.3 倍和 1.9 倍,但差距已显著缩小,东、中、西部的增长率分别是 3.4%、41.2% 和 21.2%。北方和南方人均 GDP 分别为 45 884 元和 32 770 元,北方人均 GDP 增幅远高于南方,分别为 37.5% 和 1.2%,北方人均 GDP 将比南方高 40.0%。表明在输出区粮食虚拟水转换为工业用水后,当前为粮食输出区的北方的人均 GDP 将有较大的增长潜力。

3 讨论

我国水资源压力已总体上处于中等水资源压力水平,北方处于高水资源压力水平,未来要实现人口高峰期增产 500 亿 kg 粮食,不能再通过提高水资源开发利用,增加农业灌溉量来实现,唯一的途径是提高农业用水效率^[9]。我国粮食输出区多为经济欠发达、水资源缺乏的地区,输入区多为经济相对发达、水资源相对丰沛的地区,输出区用水效率总体高于输入区。表明尽管输入区经济实力强,但由于第一产业比重小,水资源又相对丰沛,对农业生产用水投入不够重视,粮食生产用水效率相对较低,未来输入区应重视粮食生产及用水水平的提高,适当增加

高耗水粮食作物的种植面积^[30]。我国粮食虚拟绿水含量高于蓝水,绿水在粮食生产中具有重要地位,为充分利用绿水,除应确保粮食播种面积不减少之外,各区域还应通过调整作物种植结构,增加绿水利用比例高的作物种植面积^[31]。粮食生产向缺水的北方和经济欠发达的中西部转移与集中,在未来一定时期内将长期存在并有一定的加强趋势^[3,8-9],给我国粮食安全带来了隐患,为扭转这一不利态势,应实施粮食虚拟水补偿政策,从粮食虚拟水输入区征收,补偿虚拟水输出区^[3]。

4 结论

(1)我国粮食输出区虚拟水含量低于输入区,在国家尺度上,2010 年节约广义水资源 578.9 亿 m³,输出区蓝水利用比例低于输入区,有利于节约机会成本较高的蓝水。

(2)我国水资源压力指数为 1.34,处于中等水资源压力水平;粮食输出区水资源压力远大于输入区,给输出区带来了严重的水资源压力和生态压力,也给我国粮食安全带来隐患,粮食虚拟水“北水南调”增加了我国北方水资源压力。

(3)粮食输出区人均 GDP 低于粮食输入区,不利于区域的协调发展,输出区存在将粮食生产用水转变为其他产业用水来发展经济的可能,给我国粮食安全带来了隐患;中西部向东部输出粮食虚拟水,进一步加大了我国区域间经济差距。

参 考 文 献

- 1 Allan J A. Virtual water—the water, food, and trade nexus: useful concept or misleading metaphor[J]. Water International, 2003, 28(1): 4–11.
- 2 Allan J A. Overall perspectives on countries and regions[C]//Rogers P, Lydon P. Water in the Arab World: Perspectives and Prognoses. Massachusetts, USA: Harvard University, 1994: 65–100.
- 3 吴普特,王玉宝,赵西宁. 2010 中国粮食生产水足迹与区域虚拟水流动报告[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.
- 4 Wang Y B, Wu P T, Zhao X N, et al. Virtual water flows of grain within China and its impact on water resource and grain security in 2010[J]. Ecological Engineering, 2014, 69(8): 255–264.
- 5 Chapagain A K, Hoekstra A Y, Savenije H H G. Water saving through international trade of agricultural products[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2006, 10(6): 455–468.
- 6 Chapagain A K, Hoekstra A Y. The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands[J]. Ecological Economics, 2007, 64(1): 109–118.
- 7 Hoekstra A Y, Hung P Q. Globalisation of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade[J]. Global Environmental Change, 2005, 15(1): 45–56.
- 8 Yang H. Trends in China's regional grain production and their implications[J]. Agricultural Economics, 1998, 19(3): 309–325.
- 9 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[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 1–6. Wu Pute, Zhao Xining, Cao Xinchun, et al. Status and thoughts of Chinese “agricultural north-to-south water diversion virtual engineering”[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 1–6. (in Chinese)
- 10 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[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 102–107. Ma Jing, Wang Dangxian, Hoekstra A Y, et al. Application of the virtual water trade to China's grain security[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1): 102–107. (in Chinese)
- 11 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.
- 12 Guan D B, Hubacek K. Assessment of regional trade and virtual water flows in China[J]. *Ecological Economics*, 2007, 61(1): 159 – 170.
- 13 孙才志, 陈丽新, 刘玉玉. 中国省级间农产品虚拟水流动适宜性评价[J]. *地理研究*, 2011, 30(4): 612 – 621.
Sun Caizhi, Chen Lixin, Liu Yuyu. Suitability evaluation of crops virtual water flows in China[J]. *Geographical Research*, 2011, 30(4): 612 – 621. (in Chinese)
- 14 赵旭, 杨志峰, 陈彬. 基于投入产出分析技术的中国虚拟水贸易及消费研究[J]. *自然资源学报*, 2009, 24(2): 286 – 294.
Zhao Xu, Yang Zhifeng, Chen Bin. Study on Chinese virtual water trade and consumption in an input-output framework[J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(2): 286 – 294. (in Chinese)
- 15 田贵良. 虚拟水贸易影响水安全及粮食安全研究综述[J]. *河海大学学报: 哲学社会科学版*, 2014, 16(1): 56 – 60.
Tian Guiliang. Research overview on impact of virtual water trade concerning of water security and food security[J]. *Journal of Hohai University: Philosophy and Social Sciences*, 2014, 16(1): 56 – 60. (in Chinese)
- 16 Sun S K, Wu P T, Wang Y B, et al. The virtual water content of major grain crops and virtual water flows between regions in China[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2013, 90(36): 1427 – 1437.
- 17 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 Yuping, Lei Hongjun, Pan Hongwei, 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)
- 18 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2011[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- 19 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴 2011[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- 20 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报 2010[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- 21 中华人民共和国水利部. 中国水利年鉴 2011[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- 22 王璇. 经济发展对工业用水量的影响研究——基于我国东中西部面板数据的实证检验[J]. *哈尔滨商业大学学报: 社会科学版*, 2012(4): 39 – 43.
Wang Xuan. Research of the economic development effect on industrial water consumption—based on empirical test of panel data in eastern China, central China and western China[J]. *Journal of Harbin University of Commerce: Social Science Edition*, 2012(4): 39 – 43. (in Chinese)
- 23 Smith M. CROPWAT: a computer program for irrigation planning and management, FAO irrigation and drainage paper 46[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1992.
- 24 Döll P, Sieber S. Global modeling of irrigation water requirements[J]. *Water Resources Research*, 2002, 38(4): 8 – 1 – 8 – 10.
- 25 Hoekstra A Y, Mekonnen M M, Chapagain A K, et al. Global monthly water scarcity: blue water footprints versus blue water availability[J]. *PLoS ONE*, 2012, 7(2): e32688.
- 26 贾绍凤, 张军岩, 张士锋. 区域水资源压力指数与水资源安全评价指标体系[J]. *地理科学进展*, 2002, 21(6): 538 – 545.
Jia Shaofeng, Zhang Junyan, Zhang Shifeng. Regional water resources stress and water resources security appraisalment indicators [J]. *Advances of Geography*, 2002, 21(6): 538 – 545. (in Chinese)
- 27 Pfister S, Koehler A, Hellweg S. Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA[J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(11): 4098 – 4104.
- 28 Aldaya M M, Allan J A, Hoekstra A Y. Strategic importance of green water in international crop trade [J]. *Ecological Economics*, 2010, 69(4): 887 – 894.
- 29 Ridoutt B G, Pfister S. A revised approach to water footprinting to make transparent the impacts of consumption and production on global freshwater scarcity[J]. *Global Environmental Change*, 2010, 20(1): 113 – 120.
- 30 Wang Y B, Wu P T, Engel B A, et al. Application of water footprint combined with a unified virtual crop pattern to evaluate crop water productivity in grain production in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 497 – 498: 1 – 9.
- 31 Wang Y B, Wu P T, Engel B A, et al. Comparison of volumetric and stress-weighted water footprint of grain products in China [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 324 – 333.