

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.04.005

江苏省农产品水足迹与虚拟水流动及其环境影响

刘 静^{1,2}, 余钟波^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:在量化江苏省农业生产水足迹、消费水足迹及虚拟水流动基础上,分析与水资源消耗相关的环境影响,以及对人类健康、生态质量及资源的影响。江苏省农业生产水足迹、消费水足迹、虚拟水流出及流入分别为110.97亿m³、37.98亿m³、74.99亿m³和2.00亿m³,前三者主要受水稻和小麦的影响,后者主要受奶类、油料和牛肉的影响;其相关的人类健康影响分别为26.02万DALY、9.30万DALY、17.58万DALY和0.87万DALY,生态质量影响分别为19.02亿m²·a、6.69亿m²·a、12.85亿m²·a和0.53亿m²·a,资源影响分别为0、1.47亿MJ、0和1.47亿MJ。分析结果表明:节水技术应用及节水品种培育有助于减小生产水足迹,消费模式转变有助于降低消费水足迹,贸易结构调整及贸易地区选择有利于改变现有虚拟水流动模式;水足迹及虚拟水流动量值是影响江苏省水资源消费相关环境影响的重要因素,减少水资源消耗,降低农业用水比重,改变产品调入区域等均有助于减小环境影响。

关键词:水足迹;虚拟水;环境影响;农产品;江苏省

中图分类号:TV213.4 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2020)04-0320-07

Water footprints and virtual water flows of agricultural products in Jiangsu and their environmental impacts

LIU Jing^{1,2}, YU Zhongbo^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In this study, the water footprint of agricultural production, water footprint of consumption and virtual water flows were quantified, and the related environmental impacts of water consumption on human health, ecosystem equality and resources were evaluated. Results indicated that the water footprint of agricultural production, water footprint of consumption, virtual water exports and virtual water imports were 110.97×10⁸, 37.98×10⁸, 74.99×10⁸ and 2.00×10⁸ m³, respectively. Milk, oil-bearing crops and beef were dominated products of virtual water imports, while the water footprint of production, water footprint of consumption and virtual water exports were mainly influenced by rice and wheat. For water footprint of production, water footprint of consumption, virtual water exports and virtual water imports, related impacts on human health were 26.02×10⁴, 9.30×10⁴, 17.58×10⁴ and 0.87×10⁴ DALY, impacts on ecosystem equality were 19.02×10⁸, 6.69×10⁸, 12.85×10⁸ and 0.53×10⁸ m²·a and impacts on resources were 0, 1.47×10¹⁴, 0 and 1.47×10¹⁴ J. In addition, the applications of water-saving

基金项目:国家自然科学基金(51609063);中央高校基本科研业务费专项(B200202027);国家重点研发计划(2018YFF0215702);水文水资源与水利工程科学国家重点实验室专项(20145027312)

作者简介:刘静(1986—),女,副教授,博士,主要从事水土资源管理研究。E-mail:liujing0027@hhu.edu.cn

通信作者:余钟波,教授。E-mail:zyu@hhu.edu.cn

引用本文:刘静,余钟波.江苏省农产品水足迹与虚拟水流动及其环境影响[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(4):320-326.

LIU Jing, YU Zhongbo. Water footprints and virtual water flows of agricultural products in Jiangsu and their environmental impacts[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(4): 320-326.

technology and cultivation of new crop variation would contribute to the decrease of water footprint of production and the changes of consumption pattern from water-intensive animal products to water-extensive crop products, which would be helpful in decreasing regional water footprint of consumption. Virtual water imports increased the regional water availability and virtual water exports mean water losing for Jiangsu province. The adjustment of trade pattern and change of trade partner would be helpful in alleviating regional water stress. The environmental impacts related to water consumption in Jiangsu province was influenced by the volumes of water footprint and virtual water flows. Therefore, the decrease of water consumption, smaller ratio for agricultural water withdrawal and change of importing regions would be helpful in decreasing regional environmental impacts.

Key words: water footprint; virtual water; environmental impacts; agricultural products; Jiangsu Province

2002 年荷兰学者 Hoekstra 等^[1]首次提出水足迹概念,拓宽了传统水资源评价体系,为水资源科学管理提供了重要理论依据。水足迹包括生产水足迹与消费水足迹,生产水足迹是某一区域生产行为所消耗的水资源数量,既包括生产当地消费产品或服务所消耗的水资源,也包括生产输出产品或服务所消耗的水资源;消费水足迹是用于生产某一区域居民所消费产品或服务所消耗的水资源数量,该生产行为可能发生在当地,也可能发生在该区域外^[2]。伴随产品贸易,区域间产生虚拟水形态水资源贸易,称为虚拟水流动或虚拟水贸易,虚拟水贸易将外部区域考虑在内,为缓解区域水资源压力提供了一条新思路。大量学者针对生产水足迹、消费水足迹及虚拟水流动开展了相关研究,主要集中在量化分析^[3-6],影响因素分析^[7-9]及区域水资源评价^[10-11]等方面,同时包括全球、国家、地区等多个研究尺度^[12-14]。环境影响分析是资源消耗分析的重要研究方向,目前的研究主要集中于土地资源、能源和物质消耗等^[15-16]。国外学者针对水资源消耗相关环境影响开展了研究^[17-18],国内学者也分析了农产品、纺织品等生产过程中水资源消耗对应的环境影响^[19-20],但综合考虑水足迹的生产角度、消费角度以及虚拟水流动的水资源消耗环境影响研究相对较少。

本文在分析其农业生产水足迹、消费水足迹及虚拟水流动基础上,从 3 个方面分析了水资源消耗行为相关的环境影响:对人类健康的影响,对生态质量的影响及对资源的影响,以期为区域水资源管理提供参考。

1 研究方法

1.1 农产品蓝水生产水足迹、消费水足迹及虚拟水流动计算

不同种类农产品蓝水生产水足迹为蓝水虚拟水含量与产品产量乘积,消费水足迹为产品虚拟水含量与消费量乘积,虚拟水流动量则为产品虚拟水含量与贸易量乘积。本文中农产品包含作物与动物产品两类。其中作物蓝水虚拟水含量为^[1]

$$V_c = \frac{W_c}{Y} = \frac{10\max(E_c - P_e)}{Y}$$

(1)

式中: V_c ——作物蓝虚拟水含量, m^3/kg ; W_c ——作物生育期蓝水资源利用量, m^3/hm^2 ; Y ——作物单位面积产量, kg/hm^2 ; 10——单位转化系数,将单位由水深 mm 转化为单位面积水 m^3/hm^2 ; E_c ——作物生育期蒸腾量,mm,根据彭曼公式计算; P_e ——作物生育期利用的有效降雨量,mm。

动物产品蓝水虚拟水含量 V_a (m^3/kg) 可根据下式计算^[1]:

$$V_a = V_f + V_d + V_s$$

(2)

式中: V_f ——动物产品饲料相关的蓝水虚拟水含量, m^3/kg ; V_d ——动物产品饮水相关的蓝水虚拟水含量, m^3/kg ; V_s ——动物产品服务相关的蓝水虚拟水含量, m^3/kg 。

1.2 环境影响分析

环境影响分析主要根据 Eco-indicator-99 评价方法,包含对人类健康、生态质量及资源影响分析^[21]。对人类健康的影响 H (disability adjusted life years, DALY) 可根据下式计算:

$$H = W_s W_a H_d \frac{1}{W_r} D W$$

(3)

式中: W_s ——水资源压力指数; W_a ——农业用水比重; H_d ——人类发展因子,根据人类发展指标计算^[17]; W_r ——最小人均水资源需求, $\text{m}^3/(\text{a} \cdot \text{人})$; D ——影响因子,DALY/ $(\text{a} \cdot \text{人})$,衡量营养不良产生的影响,本

文假定其为 $0.0184 \text{ DALY}/(\text{a} \cdot \text{人})$; W ——水足迹或虚拟水流动, m^3 。

对生态质量的影响 E 可根据下式计算

$$E = IW$$

(4)

式中: I ——生态质量影响因子, $\text{m}^2 \cdot \text{a}/\text{m}^3$, 通过受可用水量限制的净初级生产量比例来反映生态系统脆弱性, 以降雨量为权重系数将各地区数值加权获得。各地区生态质量影响因子参考已有研究成果。

对区域水资源资源的影响 R , 根据未来实现资源可用性所消耗的能源量值来表示, 假定海水淡化技术作为主要途径。

$$R = E_d F W$$

(5)

式中: E_d ——海水淡化能源需求, J/m^3 , 根据现有技术假定为 $11 \text{ MJ}/\text{m}^3$; F ——水资源消耗特征因子, 反映地下水过度开采或其他水体不合理使用等原因, 进而产生水资源存量枯竭的可能性, 通过用水量与可用水量计算^[18]。

1.3 数据来源

气象数据(气温、降水、相对湿度、风速以及日照时数等)来自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>), 农产品产量、消费及人口来自中国统计年鉴和中国农业统计资料, 水资源用量及可用量来自中国水资源公报, 人类发展指标来自中国人类发展报告。所有数据均采用2015年数值。

2 结果与讨论

2.1 水足迹与虚拟水流动

结合作物、动物产品虚拟水含量及各产品生产、消费及贸易模式, 可得到江苏省不同农产品对应水足迹及虚拟水流动情况(图1)。由图1(a)可看出, 江苏省水稻和小麦生产水足迹显著大于其他农产品, 玉米、薯类、糖料作物、牛肉、羊肉和奶类对应生产水足迹较小, 不足1亿 m^3 , 糖料作物最小。这主要由区域农业生产布局及农产品生产效率差异造成。水稻为高耗水作物, 节水灌溉技术应用及节水品种培育均有助于提高水稻农业用水效率, 减小其生产水足迹。根据江苏省居民现有消费模式, 可得到农产品对应消费水足迹(图1(b))。水稻的消费量仅次于蔬菜, 但后者生育期较短, 因而水稻成为拥有最大消费水足迹的农产品。

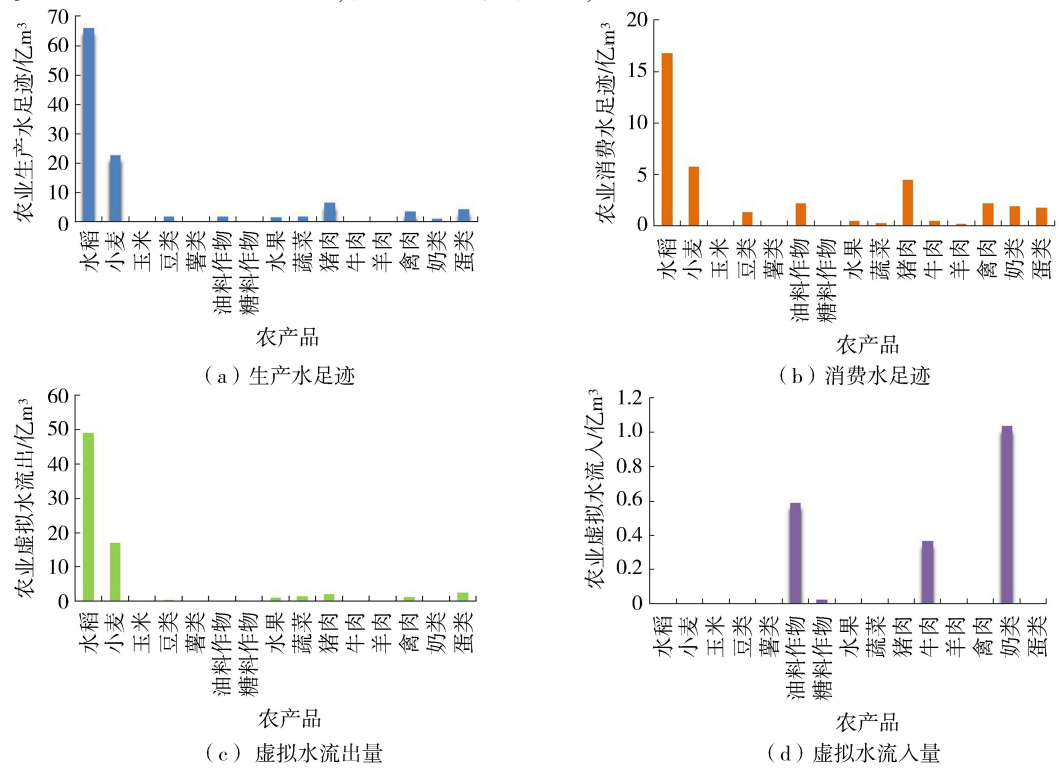


图1 江苏省不同农产品对应水足迹与虚拟水流动

Fig.1 Water footprints and virtual water flows for different kinds of agricultural products in Jiangsu Province

相对作物,动物产品的生产通常需要消耗较多水资源,因而具有较大虚拟水含量,动物产品对应消费水足迹约占农业水足迹 1/3。消费模式的转变有助于减小区域消费水足迹,进一步节约区域水资源。除当地消费外,江苏省生产的水稻和小麦大量输出,对应虚拟水流出量为 49.13 亿 m³ 和 16.92 亿 m³,占区域虚拟水流出量近 90%。而油料、糖料、牛肉和奶类消费需求不能仅通过当地生产得到满足,对应 2.00 亿 m³ 虚拟水流入(图 1(c)和(d))。虚拟水流入增加了江苏省可用水资源,而虚拟水流出则意味着“水资源损失”^[22]。区域贸易结构调整以及贸易地区选择,有利于改变现有虚拟水流动模式。

2.2 水足迹及虚拟水流动相关的人类健康影响

图 2 给出了不同农产品生产水足迹、消费水足迹、虚拟水流出及虚拟水流入对应的对人类健康的影响。由图 2 可看出,水足迹及虚拟水流动对应的对人类健康的影响分布趋势与水足迹及虚拟水流动分布趋势主体一致,说明水足迹及虚拟水流动量是影响江苏省水资源消费相关人类健康影响的重要因素。水稻生产水足迹、消费水足迹及虚拟水流出相关的人类健康影响均明显大于其他农产品水资源消费对应环境影响,其数值分别为 15.45 万 DALY、3.93 万 DALY 和 11.52 万 DALY。奶类进口相关的虚拟水流入相关的人类健康影响则明显大于其他农产品,其数值为 0.58 万 DALY。除水足迹及虚拟水流动相关调控措施外,区域水资源压力及农业用水比重等均是影响产品对应水足迹或虚拟水流动相关的人类健康影响的重要因素。因此,通过采用节水技术等措施减少水资源消耗,尤其是高耗水的农业部门,降低农业用水比重等均有助于减小水足迹及虚拟水流动对应环境影响。

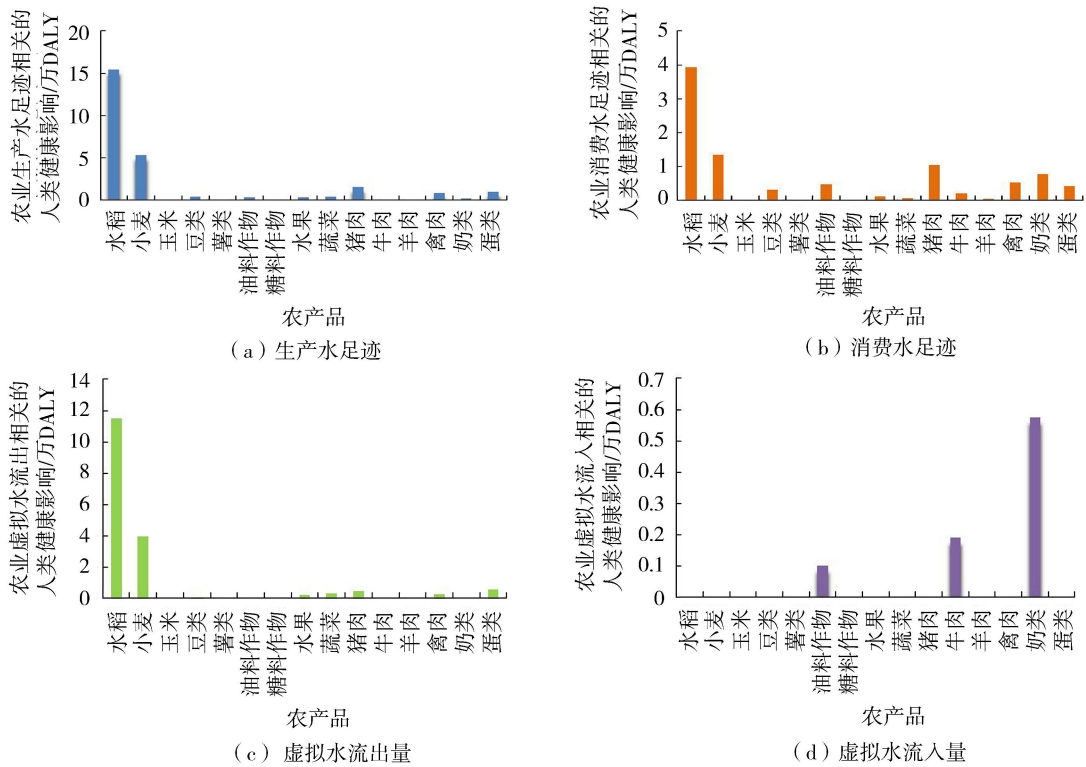


图 2 江苏省不同农产品水足迹与虚拟水流动相关的人类健康影响

Fig.2 Impacts on human health due to water footprints and virtual water flows for different kinds of agricultural products in Jiangsu province

2.3 水足迹及虚拟水流动相关的生态质量影响

江苏省生产水足迹、消费水足迹及虚拟水流出相关的生态质量影响主要受水稻和小麦影响,二者对应的环境影响分别为 15.18 亿 m² · a、3.86 亿 m² · a 和 11.32 亿 m² · a,分别占农产品相关环境影响的 79.83%、57.70% 和 88.09%(图 3)。这与水足迹及虚拟水流出量值密切相关。虚拟水流入相关的生态质量影响为 0.53 亿 m² · a,其中奶类、牛肉、油料和糖料对应比例分别为 59.96%、20.02%、19.18% 和 0.84%。除虚拟水流入量值影响外,根据生态质量因子,适当改变产品调入区域,有助于减小虚拟水流入相关的生态质量影响。

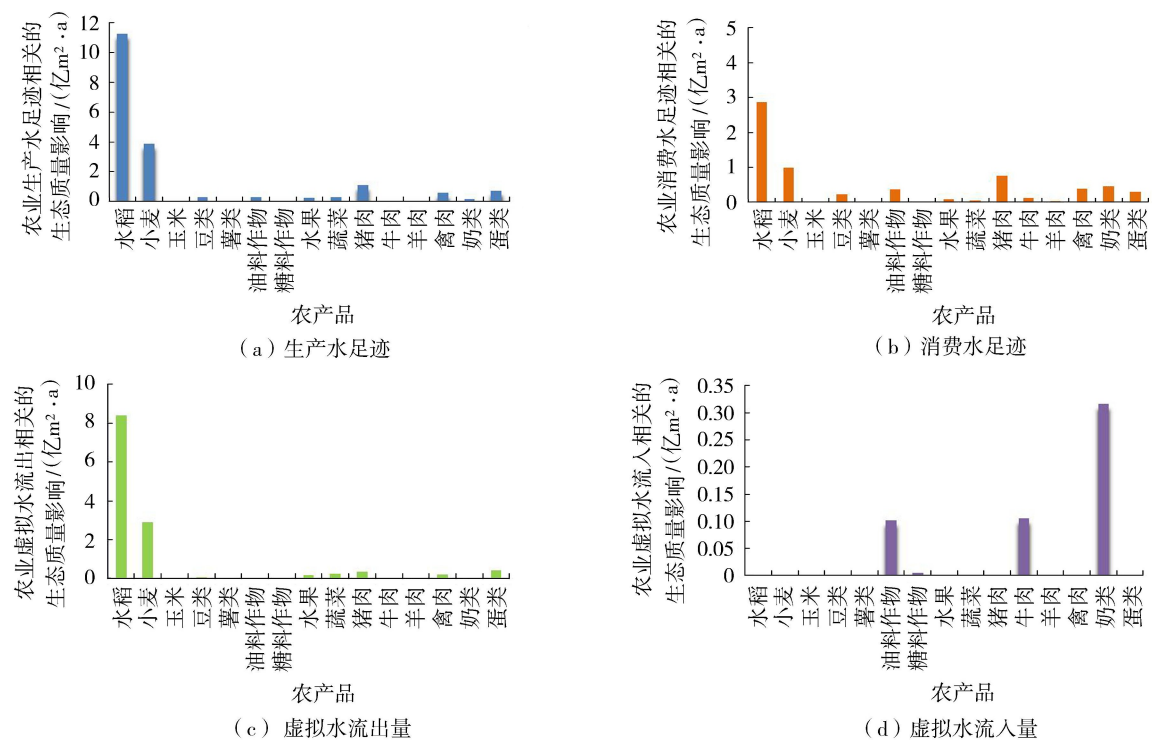


图3 江苏省不同农产品水足迹与虚拟水流动相关的生态质量影响

Fig.3 Impacts on ecosystem equality due to water footprints and virtual water flows for different kinds of agricultural products in Jiangsu province

2.4 水足迹及虚拟水流动相关的资源影响

本文中资源影响主要针对水资源耗尽情况。江苏现有用水量小于可用水量,水资源可通过降雨等形式补给,不存在资源耗竭情况,因此水资源消耗特征因子为0,仅农产品消费水足迹中来自其他地区的水资源调入存在资源影响。由图4可看出,农产品虚拟水流入相关的资源影响为1.47亿MJ,其中奶类、牛肉、油料和糖料对应比例分别为74.27%、16.13%、9.59%和0.02%。除虚拟水流动量调整措施外,将进口区从水资源压力较大区域转为水资源压力较小区域,有助于减小江苏省现有的资源影响。

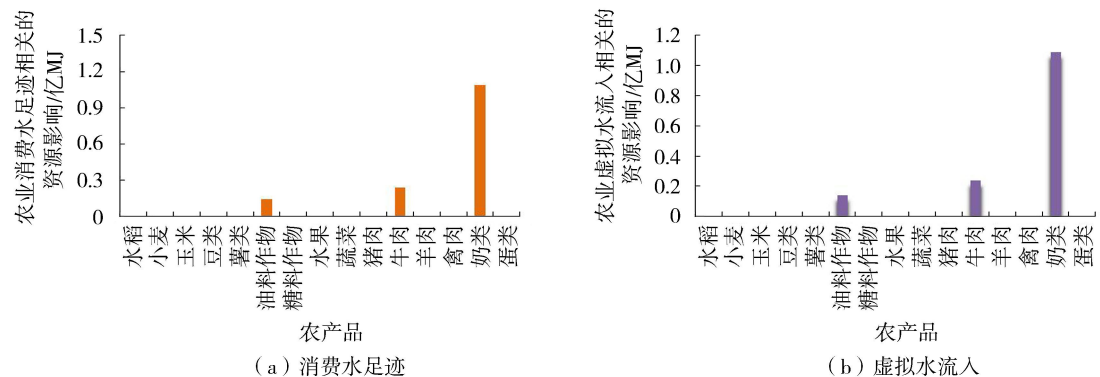


图4 江苏省不同农产品对应消费水足迹及虚拟水流入相关的资源影响

Fig.4 Impacts on resources due to water footprint of consumption and virtual water import for agricultural products

环境影响是资源消耗分析的重要方面,我国出口导向的生产及贸易战略未将水资源消耗的环境影响纳入考虑,从长远角度来说,是不可持续的。该研究有助于建立区域资源消耗环境影响分析体系,为构建更为合理的生产、消费及贸易战略服务。目前没有单一指标能衡量环境影响各方面,本文所选择的指标仅涉及对人类健康、生态质量及水资源的影响,未来还需结合其他指标。同时,本文环境影响对象为产品生产地区,因此生产和输出行为仅考虑当地影响,而消费和进口行为需同时考虑产品进口地。此外,基于数据可获取性等原因,本文主要考虑蓝水资源,并未涉及绿水资源。国外学者已通过不同方法对绿水资源产生的环境影响进

行了量化^[23-24],未来将蓝水和绿水统筹考虑,有助于实现更合理的区域管理。

3 结 语

江苏省农业生产水足迹、消费水足迹、虚拟水流出及流入分别为 110.97 亿 m³、37.98 亿 m³、74.99 亿 m³ 和 2.00 亿 m³,前三者主要受水稻和小麦影响,后者主要受奶类、油料和牛肉影响。节水灌溉技术应用及节水品种培育有助于提高农业用水效率,减小生产水足迹,消费模式转变有助于减小区域消费水足迹,节约区域水资源。贸易结构调整以及贸易地区选择,有利于改变现有虚拟水流动模式,改善现有水资源利用现状。

农业生产水足迹、消费水足迹、虚拟水流出及流入相关的人类健康影响分别为 26.02 万 DALY、9.30 万 DALY、17.58 万 DALY 和 0.87 万 DALY,生态质量影响分别为 19.02 亿 m² · a、6.69 亿 m² · a、12.85 亿 m² · a 和 0.53 亿 m² · a,资源影响分别为 0、1.47 亿 MJ、0 和 1.47 亿 MJ。水足迹及虚拟水流动量值是影响江苏省水资源消费相关人类健康影响及生态质量影响的重要因素。除水足迹及虚拟水流动调控措施外,采用节水技术等措施减少水资源消耗,尤其是高耗水的农业部门,降低农业用水比重,适当改变产品调入区域等有助于减小水足迹及虚拟水流动对应环境影响。

参考文献:

[1] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, et al. The water footprint assessment manual: setting the global standard [M]. London: Earthscan, 2011.

[2] 黄凯,王梓元,杨顺顺,等. 水足迹的理论、核算方法及其应用进展[J]. 水利水电科技进展,2013,33(4):78-83. (HUANG Kai, WANG Ziyuan, YANG Shunshun, et al. Theory, calculation method and application progress of water footprint[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(4): 78-83. (in Chinese))

[3] ERCIN A E, MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. Sustainability of national consumption from a water resources perspective: the case study for France[J]. Ecological Economics, 2013, 88:133-147.

[4] SCHYNS J F, HOEKSTRA A Y, BOOIJ M J. Review and classification of indicators of green water availability and scarcity[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19 (11):4581-4608.

[5] 刘淑彬,孙才志. 中国居民膳食虚拟水消费的区域特征分析[J]. 水利经济,2018,36(3):29-34. (LIU Shubin,SUN Caizhi. Regional features of consumption of residents' dietary virtual water in China[J]. Journal of Economics of Water Resources,2018, 36(3):29-34. (in Chinese))

[6] 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. (XU Xin,GE Yihu. Driving effect and spatial linkage of virtual water for grains in China[J]. Journal of Economics of Water Resources,2018,36(6):31-36. (in Chinese))

[7] ERCIN A E, HOEKSTRA A Y. Water footprint scenarios for 2050: a global analysis[J]. Environment International, 2014, 64 (3):71-82.

[8] TAMEA S, CARR J A, LAIO F, et al. Drivers of the virtual water trade[J]. Water Resources Research, 2014, 50(1):17-28.

[9] 任晓晶,白雪,刘丹,等. 水足迹评价方法对比及案例研究[J]. 水利经济,2018,36(6):14-19. (REN Xiaojing,BAI Xue,LIU Dan,et al. Comparison and case study of assessment methods for water footprints[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018,36(6):14-19. (in Chinese))

[10] LUTTER S, PFISTER S, GILJUM S, et al. Spatially explicit assessment of water embodied in European trade: a product-level multi-regional input-output analysis[J]. Global Environmental Change, 2016, 38:171-182.

[11] 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 Pute, GAO Xuerui, ZHAO Xining, 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))

[12] 杨志峰,支援,尹心安. 虚拟水研究进展[J]. 水利水电科技进展,2015,35(5):181-190. (YANG Zhifeng, ZHI Yuan, YIN Xin'an. Research advances in virtual water[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2015,35(5):181-190. (in Chinese))

[13] 韩宇平,贾冬冬,黄会平,等. 基于通径分析的海河流域冬小麦水足迹及影响因素 [J]. 水资源保护,2019,35(1): 6-13. (HAN Yuping,JIA Dongdong, HUANG Huiping,et al. Water footprint of winter wheat and its influencing factors in Haihe River Basin based on path analysis[J]. Water Resources Protection, 2019,35(1): 6-13. (in Chinese))

[14] 孙克,聂坚. 基于引力模型的省域灰水足迹空间关联网络分析 [J]. 水资源保护,2019,35(6):29-36. (SUN Ke, NIE Jian.

Spatial correlation network analysis of provincial grey water footprint based on gravity model[J]. Water Resources Protection, 2019,35(6):29-36. (in Chinese))

[15] KUMMU M, GUILLAUME J H A, DE MOEL H, et al. The world's road to water scarcity: shortage and stress in the 20th century and pathways towards sustainability[J]. Scientific Reports, 2016, 6:38495.

[16] SOKKA L, SINKKO T, HOLMA A, et al. Environmental impacts of the national renewable energy targets;a case study from Finland[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 59: 1599-1610.

[17] SANDIN G, PETERS G M, SVANSTROM M. Moving down the cause-effect chain of water and land use impacts: an LCA case study of textile fibres[J]. Resources Conservation and Recycling, 2013,73:104-113.

[18] BOULAY A M, BARE J, DE CAMILLIS C, et al. Consensus building on the development of a stress-based indicator for LCA-based impact assessment of water consumption: outcome of the expert workshops[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2015, 20(5): 577-583.

[19] 胡婷婷, 黄凯, 金竹静, 等. 滇池流域主要农业产品水足迹空间格局及其环境影响测度[J]. 环境科学学报, 2015, 35(11):3719-3729. (HU Tingting, HUANG Kai, JIN Zhuqing, et al. Spatial pattern of the agricultural water footprint and its environmental impact in Lake Dianchi Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(11):3719-3729. (in Chinese))

[20] 程光伟, 冯竹, 刘颖. 产品环境影响评价方法及其在纺织行业中的应用研究进展[J]. 中国标准导报,2016(10):41-46. (CHENG Guangwei, FENG Zhu, LIU Ying. Product environmental impact assessment methods and their application in textile sector[J]. China Standards Review, 2016(10):41-46. (in Chinese))

[21] PFISTER S, KOEHLER A, HELLWEG S. Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(11):4098-4104.

[22] BULSINK F, HOEKSTRA A Y, BOOIJ M J. The water footprint of Indonesian provinces related to the consumption of crop products[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14(1):119-128.

[23] QUINTEIRO P, DIAS A C, SILVA M, et al. A contribution to the environmental impact assessment of green water flows[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 93: 318-329.

[24] QUINTEIRO P, RAFAEL S, VILLANUEVA-REY P, et al. A characterization model to address the environmental impact of green water flows for water scarcity footprints[J]. Science of the Total Environment, 2018, 626: 1210-1218.

(收稿日期:2018-10-15 编辑:张志琴)

• 简讯 •

第八届水利信息化技术论坛将在上海举办

为提高水利科技创新实力,推进智慧水利建设,强化行业监管信息支撑,促进智慧水利成果转化和应用推广,提升水利信息化和智能化水平,经研究,由河海大学联合有关单位拟定于2020年8月19—21日在上海举办第八届水利信息化技术论坛。

本次论坛主题为融合、创新、协同。主要内容如下:(1)智慧水利先行先试工作方案解读;(2)智慧河湖建设实践与思考;(3)5G+AI、遥感、人工智能等技术应用;(4)智慧水利关键技术创新;(5)水文水资源监测、预警、预报技术;(6)水利自动化新技术,新装备的研究与应用;(7)防汛抗旱信息化建设现状与发展;(8)河(湖)长制管理信息系统解决方案;(9)智慧水务系统一体化解决方案;(10)优秀应用案例和典型解决方案推介。

会议详情请关注 <http://www.sinowbs.com/>

(本刊编辑部供稿)