

中国大豆进口关税调整对全球水土资源转移的影响评估

刘航, 申格, 杨婧, 吴文斌, 孙晶

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业农村部遥感重点实验室, 北京 100081)

摘要: 中美贸易争端背景下, 评估中国大豆贸易对全球水和耕地资源的影响, 对粮食安全和环境可持续意义重大。基于GTAP(Global Trade Analysis Project)模型, 以中国及其主要大豆供应国(美国、巴西、阿根廷、乌拉圭、加拿大)为研究区, 模拟中国对美国大豆加征关税前后的情景, 评估相应情景下中国大豆进口对全球水和耕地资源的影响。结果表明: 在加征关税前后情景下, 中国大豆进口总量保持稳定, 进口量中供应国之间占比变化较大, 特别是加征关税后美国占比明显减少; 虚拟耕地进口总量保持稳定, 虚拟水进口总量减少; 在全球尺度上, 从巴西进口大豆水资源利用率最高、从美国进口大豆耕地资源利用率最高。取消除美国外其他四国关税可同时减少全球水和耕地资源的消耗。

关键词: 中美贸易争端; 大豆; 虚拟水; 虚拟耕地; 粮食贸易

粮食安全是关乎国计民生、治国理政的头等大事, 也是联合国2030年可持续发展议题的重要内容。一个国家的粮食可获得能力既包括本国的粮食生产能力, 也包括其粮食进口能力^[1]。粮食进口作为粮食贸易的重要部分, 是保障国家/地区粮食安全、缓解资源短缺、实现全球资源可持续利用的重要途径。从资源利用角度看, 粮食贸易中包含着大量的水资源和耕地资源转移。学者提出了“虚拟水”(生产商品和提供服务过程中需要的水资源数量)和“虚拟耕地”(生产商品和提供服务过程中需要的耕地资源数量)的概念^[2,3], 用于粮食贸易中虚拟水和虚拟耕地转移的量化评估, 为全球水和耕地资源的科学管理及可持续利用提供重要信息。

国内外针对粮食贸易中虚拟水和虚拟耕地的研究多集中于以下方面: 国际贸易中虚拟水和虚拟耕地的转移^[4-6], 省际贸易中虚拟水和虚拟耕地的转移^[7,8], 单一作物的虚拟水和虚拟耕地贸易^[9,10], 多种作物虚拟水和虚拟耕地贸易^[11-13], 也有侧重于理论和方法的研究^[14-16]。研究普遍认为: 水和耕地资源短缺的国家/地区, 通过粮食进口可以缓解内部资源不足的压力^[17,18], 实现全球范围内水和耕地资源的合理有效利用^[19,20]。然而, 研究发现, 虽然贸易政策对粮食贸易的影响巨大, 粮食贸易中虚拟资源的相关研究却很少涉及贸易政策, 特别是在贸易争端背景下, 很多国家调整粮食贸易关税, 会引起虚拟水和虚拟耕地的动态变化。

中美两国作为贸易合作伙伴, 是全球重要的贸易大国, 两国间多年贸易总额达到全球贸易总额的1/4^[21]。然而, 2018年伊始中美贸易摩擦逐步演化成贸易争端^[22], 严重影响

收稿日期: 2020-05-29; 修订日期: 2020-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871356)

作者简介: 刘航(1992-), 女, 湖北恩施人, 博士研究生, 主要从事农情资源遥感研究。E-mail: liuhang@caas.cn

通讯作者: 孙晶(1982-), 男, 天津人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事人地系统耦合机理与模拟研究。

E-mail: sunjing@caas.cn

了两国乃至世界各国的粮食贸易^[23-25],对社会、经济、环境等方面产生了重要影响。为厘清贸易政策变化影响下粮食贸易中全球水和耕地资源的动态,本文选取重要的贸易作物大豆作为研究对象,通过对大豆贸易中虚拟水和虚拟耕地资源的核算,开展中美贸易争端背景中不同大豆关税情景下,中国大豆贸易对全球水和耕地资源影响的量化评估。中国是大豆原产国,但近些年价格低廉的进口大豆迅速挤占国内的大豆种植和消费市场,目前中国已成为全球最大的大豆进口国^[26]。基于不同大豆关税情景下的虚拟资源转移量,开展中国大豆贸易对水和耕地资源影响的量化评估,有利于从粮食安全、资源环境角度,为中国应对贸易争端(尤其是中美贸易争端)制定合理的应对措施提供数据参考和信息支撑(既满足国内大豆需求,又减少水和耕地资源的消耗)。同时,研究结果可为增强水和耕地资源的科学管理、利用效率和潜力提供信息支撑。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

根据1996—2017年联合国粮食与农业组织(Food and Agriculture Organization, FAO)提供的数据^[26],获取了1996—2017年中国大豆进口的相关信息。本文选取1996年为起始年份,是因为这一年中国由大豆净出口国转为净进口国,2017年为研究进行时FAO可查的最新年份。中国从巴西、美国、阿根廷、乌拉圭及加拿大进口的大豆总量达到中国大豆进口总量的95%(1996—2017年平均),因此本文选取中国及五大供应国作为研究区域。由于1996—2017年中国大豆出口的数量和占比极少,未纳入本文。

1.2 数据与方法

本文从三方面展开:(1)使用全球贸易分析模型(Global Trade Analysis Project, GTAP)模型模拟中国在应对中美贸易争端时可能采取的不同大豆关税政策情景,获取相应的大豆贸易量;(2)基于各国气候及大豆生产属性,计算各国生产单位产量大豆消耗的水和耕地(本文中单位产量为1 t),获取大豆贸易中虚拟水和虚拟耕地的动态;(3)量化评估不同大豆关税情景下中国大豆贸易对全球水和耕地资源的影响。

1.2.1 GTAP模型及数据库

GTAP模型具有强大的政策模拟功能,因此本文选取该模型模拟不同大豆关税政策情景下,中国大豆进口量变化及对全球水和耕地资源的影响。GTAP包括全球性数据库、多区域多部门可计算一般均衡模型以及实现模型和数据操作的相关软件。其中,全球性数据库(第10版,2019年公布的最新版本),包括141个国家/地区、65个生产部门、5类经济要素的双边贸易信息以及相应的物流数据。GTAP模型假设生产者成本最小化和消费者效用最大化,在竞争中不断调整价格,直到所有商品供需趋于平衡。相对于一般的投入产出模型,GTAP模型具有规模大、数据完备且可以进行政策模拟分析等优势。GTAP模型和数据库已广泛应用于区域一体化、全球气候变化、粮食政策等研究领域^[27-30]。

本文选取GTAP数据库中最新数据,即2014年数据进行贸易政策模拟,其余辅助数据均以2014年为准,数据处理具体步骤如下:

(1) GTAP数据库部门拆分与数据合并

大豆在GTAP原始数据库中并非独立产业部门,为模拟大豆贸易,本文对原始数据

库油菜籽部门（含大豆）进行分离。首先，使用FAO及联合国商品贸易统计数据库（UN Comtrade database）中大豆投入产出和贸易数据^[31,32]，采用SplitCom工具将大豆从数据库原有的油菜籽产业部门中分离^[33]。然后，利用GTAPAgg软件将原始及新增的共计66个产业部门，合并成大豆、其他油菜籽、谷物、蔬菜、工业、能源及服务18个主要部门。最后，将原始数据库中141个国家合并为中国、巴西、美国、阿根廷、乌拉圭、加拿大及其他国家7个区域。

（2）辅助数据及预处理

为计算单位产量大豆消耗的水和耕地面积数量，本文获取2014年中国及其五大供应国的大豆产量、种植面积数据^[31]，平均气温、太阳辐射、风速等每日网格气象数据、海拔和纬度网格数据以及各国大豆物候数据^[34,35]。研究对上述辅助数据进行了单位换算、统一尺度等预处理工作。

1.2.2 政策情景设置

在中美贸易争端背景下，本文以GTAP数据库中2014年的真实关税数据，作为大豆关税政策模拟的基线情景，依据中国大豆进口关税的相应调整设计了四种政策情景（表1），用以模拟相应情景下的大豆贸易量，为大豆贸易中虚拟水和虚拟耕地转移计算提供数据基础。其中，四种政策情景均在基线情景基础上进行模拟，且四种情景中除大豆进口关税有差异以外，大豆及其他部门的生产、消费等其他变量均与基线情景保持不变（即等同于基线情景）。设计的四种情景包括：情景1——无关税情景，即中美双方取消对方大豆进口关税，但中美与其他四国（巴西、阿根廷、乌拉圭、加拿大）大豆保持原关税（3%，即2014年真实关税）不变；情景2——中国对美国大豆加征25%（依据2018年中国关税清单设定）关税，并保持其他四国大豆原关税不变；情景3——中国对美国大豆加征25%关税，且取消其他四国大豆关税；情景4——中国保持美国大豆原关税不变，且取消其他四国大豆关税。

表1 大豆关税政策情景设置

Table 1 Scenarios under different soybean tariffs

| 情景描述 | |
|------|---|
| 情景1 | 无关税情景，即中美双方取消对方大豆进口关税，但中美与其他四国大豆保持原关税不变 |
| 情景2 | 中国对美国大豆加征25%关税，并保持其他四国大豆原关税不变 |
| 情景3 | 中国对美国大豆加征25%关税，且取消其他四国大豆关税 |
| 情景4 | 中国保持美国大豆原关税不变，且取消其他四国大豆关税 |

1.2.3 大豆贸易中虚拟资源含量计算

（1）单位产量大豆资源含量计算

单位需水量^[36,37]：

$$SWD[n, s] = \frac{CWR[n, s]}{CY[n, s]} \quad (1)$$

$$ET_s = K_s \times ET_0 \quad (2)$$

式中： $SWD[n, s]$ 表示n国的单位产量大豆s特定需水量（ $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ）； $CWR[n, s]$ 表示作物需水量（ $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ），大豆需水量CWR根据大豆生长期累计蒸发蒸腾量 ET_s （ $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ）计算所得； $CY[n, s]$ 表示大豆单产（ $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ）； ET_0 表示作物参考蒸发蒸腾量（ $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ）；

K_s 为大豆系数。

单位耕地面积需求量^[10]:

$$VLD[n, s] = \frac{A[n, s]}{Y[n, s]} \quad (3)$$

式中: $VLD[n, s]$ 表示 n 国的单位产量大豆虚拟耕地面积需求量 ($\text{hm}^2 \cdot \text{t}^{-1}$); $A[n, s]$ 表示大豆播种面积 (hm^2); $Y[n, s]$ 表示大豆总产量 (t)。

(2) 虚拟资源贸易量计算

虚拟水贸易量^[36]:

$$VWT[n_e, n_i] = ST[n_e, n_i] \times SWD[n_e] \quad (4)$$

$$GVWI[n_i] = \sum_{n_e} VWT[n_e, n_i] \quad (5)$$

式中: $VWT[n_e, n_i]$ 表示大豆贸易中出口国 n_e 到进口国 n_i 的虚拟水总输出量 ($\text{m}^3 \cdot \text{yr}^{-1}$); $ST[n_e, n_i]$ 表示大豆贸易量 ($\text{t} \cdot \text{yr}^{-1}$); $GVWI[n_i]$ 表示虚拟水进口总量 ($\text{m}^3 \cdot \text{yr}^{-1}$)。

虚拟耕地贸易量^[3]:

$$VLT[n_e, n_i] = ST[n_e, n_i] \times VLD[n_e] \quad (6)$$

$$GVLI[n_i] = \sum_{n_e} VLT[n_e, n_i] \quad (7)$$

式中: $VLT[n_e, n_i]$ 表示大豆贸易中出口国 n_e 到进口国 n_i 的虚拟耕地总输出量 ($\text{hm}^2 \cdot \text{yr}^{-1}$); $ST[n_e, n_i]$ 表示大豆贸易量 ($\text{t} \cdot \text{yr}^{-1}$); $GVLI[n_i]$ 表示虚拟耕地进口总量 ($\text{hm}^2 \cdot \text{yr}^{-1}$)。

1.2.4 中国进口大豆中资源利用变化量计算

受气候条件、生产力水平等因素影响,不同国家生产单位产量大豆消耗的水和耕地面积不同,本文通过中国与五大供应国生产单位产量大豆消耗水和耕地的差值,结合贸易量数据,量化分析中国进口大豆对资源利用的影响,具体计算参考以下公式^[19]:

$$SWD[s] = SWD[c] - SWD[n_e] \quad (8)$$

$$VLD[s] = VLD[c] - VLD[n_e] \quad (9)$$

式中: $SWD[s]$ 和 $VLD[s]$ 分别表示生产单位产量大豆消耗的水和耕地差值 ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$; $\text{hm}^2 \cdot \text{t}^{-1}$); $SWD[c]$ 和 $VLD[c]$ 分别表示中国生产单位产量大豆消耗的水和耕地 ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$; $\text{hm}^2 \cdot \text{t}^{-1}$); $SWD[n_e]$ 和 $VLD[n_e]$ 分别表示中国大豆供应国生产单位产量大豆消耗的水和耕地 ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$; $\text{hm}^2 \cdot \text{t}^{-1}$)。结合贸易量即可获得中国进口大豆较在本国生产等量大豆,消耗的水和耕地变化量。

2 结果分析

2.1 中国大豆进口变化

在基线情景和模拟情景下,中国大豆的进口总量均未发生明显变化(图1)。具体而言,相对于基线情景,情景1下中国大豆进口总量增加0.56%(36万t)、情景2减少2%(129万t)、情景3减少0.79%(51万t)、情景4增加0.83%(54万t)。从

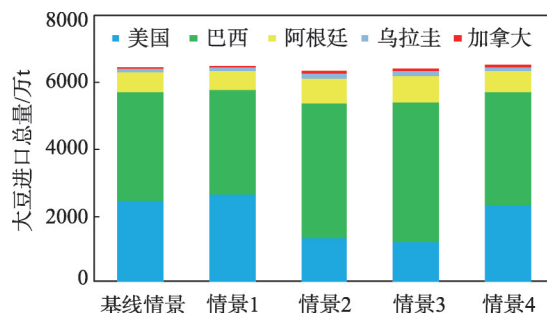


图1 中国大豆进口量变化

Fig. 1 Changes of soybean import volumes in China under different soybean tariff scenarios

五大供应国进口的大豆占比变化可见，相对于基线情景，情景1下从美国进口大豆增加，从其他四国进口大豆减少；情景2~情景4下从美国进口大豆减少，从其他四国进口大豆增加，其中情景2和情景3下从美国进口大豆大幅减少。

2.2 虚拟资源进口变化

相对于基线情景，情景1~情景4下中国虚拟水进口总量差异较大，总体来说从美国进口的虚拟水占比最大，巴西次之（图2a）。具体而言，情景1虚拟水进口总量增加4%（15亿 m^3 ），情景2减少22%（93亿 m^3 ），情景3减少23%（98亿 m^3 ），情景4减少2%（9亿 m^3 ）。从五大供应国进口的虚拟水量变化可见，相对于基线情景，情景1下从美国进口虚拟水增加20亿 m^3 ，其他四国都有小幅度减少；情景2~情景4下美国分别减少129亿 m^3 、141亿 m^3 、17亿 m^3 ，其他四国都有所增加。值得注意的是情景2和情景3下中国从美国进口的虚拟水大幅减少，直接导致虚拟水进口总量的大幅下降。

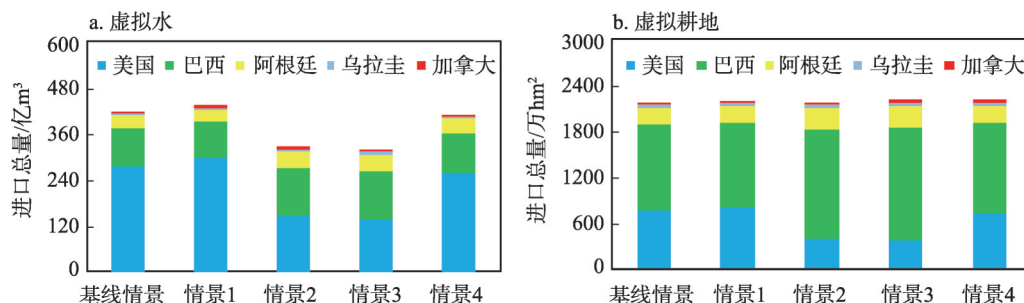


图2 中国虚拟资源进口总量变化

Fig. 2 Changes of virtual resources import volumes in China under different soybean tariff scenarios

相对于虚拟水进口总量变化，情景1~情景4下中国虚拟耕地进口总量均未发生明显变化，总体来说从巴西进口的虚拟耕地占比最大，美国次之（图2b）。相对于基线情景，情景1下中国虚拟耕地进口总量仅增加0.23%（5万 hm^2 ）；情景2下虚拟耕地进口与基线情景相同为2182万 hm^2 ；情景3、情景4下虚拟耕地进口分别增加了1.47%（32万 hm^2 ）、1.15%（25万 hm^2 ）。从五大供应国进口的虚拟耕地量变化可见，相对于基线情景，情景1下从美国进口的虚拟耕地增加55万 hm^2 ，其他四国都有不同程度的减少；情景2美国减少355万 hm^2 ，巴西增加最多280万 hm^2 ，其他三国都有小幅度增加；情景3美国减少387万 hm^2 ，巴西增加最多328万 hm^2 ，其他三国都有小幅度增加；情景4美国减少46万 hm^2 ，其他四国都有不同程度的增加。值得注意的是情景2和情景3下虽然从美国进口的虚拟耕地大幅减少，但虚拟耕地进口总量仍然与基线情景持平甚至增加。

2.3 中国进口大豆资源利用变化分析

中国和五大供应国生产单位产量大豆消耗的水和耕地差别较大（表2）。生产单位产量大豆耗水量由多到少排序为：中国、美国、加拿大、阿根廷、乌拉圭、巴西，其中，中国的耗水量最多为1968 m^3/t ，巴西的耗水量最少为298 m^3/t ；生产单位产量大豆的耕地面积消耗量由多到少排序为：中国、乌拉圭、加拿大、阿根廷、巴西、美国，其中，中国耕地消耗最多为0.56 hm^2/t ，美国耕地消耗最少为0.31 hm^2/t 。

在基线情景和模拟的4种关税情景下，中国进口大豆消耗的虚拟水比在中国生产等量大豆消耗的虚拟水，分别减少853亿 m^3 、845亿 m^3 、921亿 m^3 、941亿 m^3 、872亿 m^3

表2 中国和五大供应国生产单位产量大豆的水和耕地消耗量

| Table 2 Water and farmland consumption per unit of soybean production in China and the top five suppliers | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|
| | 中国 | 巴西 | 美国 | 阿根廷 | 乌拉圭 | 加拿大 |
| 水/(m ³ · t ⁻¹) | 1968 | 298 | 1138 | 577 | 414 | 902 |
| 耕地面积/(hm ² · t ⁻¹) | 0.56 | 0.35 | 0.31 | 0.36 | 0.42 | 0.37 |

(图3a)。中国进口大豆消耗的虚拟耕地比在中国生产等量大豆消耗的虚拟耕地，分别减少1433万hm²、1447万hm²、1361万hm²、1373万hm²、1438万hm²(图3b)。相对于基线情景，在情景1下中国大豆进口的虚拟水消耗增加8亿m³，虚拟耕地消耗减少14万hm²；在情景2和情景3下虚拟水消耗分别减少68亿m³、88亿m³，但虚拟耕地消耗分别增加72万hm²、60万hm²；在情景4下虚拟水和虚拟耕地消耗同时减少，分别减少19亿m³、5万hm²。

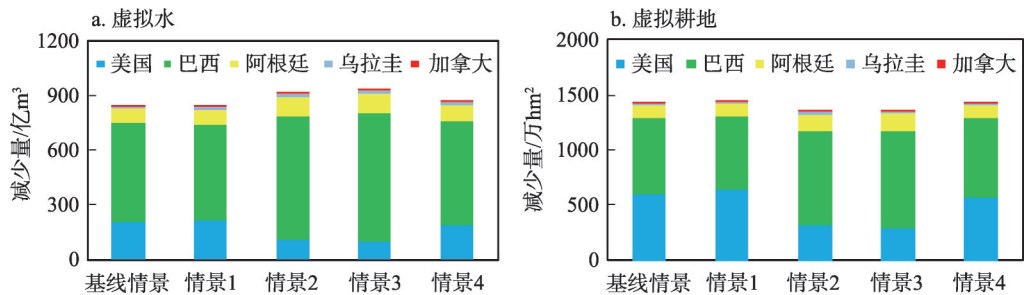


图3 中国进口大豆引起的虚拟资源减少量

Fig. 3 The reduction of virtual resources contributed by imported soybeans in China

3 结论与讨论

3.1 结论

本文在中美贸易争端背景下，使用可计算一般均衡模型GTAP，从虚拟水和虚拟耕地角度量化评估中国大豆贸易对全球水和耕地资源的影响，相关结论如下：

(1) 相对于基线情景，模拟的四种情景对中国大豆进口总量影响较小；在情景1~情景4下从巴西进口的大豆占比最大，从美国进口的大豆变化最明显。其中，中国对美国大豆加征25%关税（情景2），会引起从美国进口的大豆大幅减少；同时，如果取消其他四国大豆进口关税（情景3），会进一步减少从美国进口的大豆。

(2) 相对于基线情景，情景1~情景4下中国虚拟水进口总量差别较大；虚拟耕地进口总量差别较小。情景1~情景4下中国虚拟水进口占比以美国为主、巴西为次，其他三国为更次要；虚拟耕地进口占比以巴西为主、美国为次，其他三国为更次要。

(3) 中国进口大豆可以缓解中国及全球水和耕地资源压力。生产单位产量大豆时，五大供应国水和耕地消耗量均低于中国，因此中国进口大豆比在中国生产等量大豆消耗的水和耕地更少。中国从巴西进口大豆更能减轻全球水资源压力，主要是因为地处不同气候带，五大供应国的日平均气温、风速、饱和蒸汽压等气候因子以及大豆生长周期时长存在差异，使得大豆累计参考蒸发蒸腾量不同，巴西大豆主产区属于终年高温的热带雨林气候^[38]，且大豆生长周期较短，因此需水量较其他供应国更少；中国从美国进口大豆更能减轻全球耕地资源压力，受农业生产力、农业机械化水平差异影响，美国生产单

位产量大豆消耗的耕地资源较其他供应国更少。

(4) 中美取消对方进口大豆关税时(情景1), 中国进口大豆消耗的耕地资源增加, 水资源减少; 中国采取对美国大豆加征25%关税, 不论是否取消其他四国大豆关税(情景2和情景3), 进口大豆消耗的水资源减少, 耕地资源增加; 中国保持对美国大豆原关税不变, 且取消其他四国大豆关税时(情景4), 进口大豆消耗的水和耕地资源均减少。

3.2 讨论

(1) 根据量化评估结果, 本文对贸易争端背景下中国大豆贸易的可持续发展提出如下建议: ① 通过保持对美国大豆进口原关税不变, 取消其他四国大豆关税(即情景4), 可以实现既满足国内大豆需求又减轻全球水和耕地资源压力的双赢。② 在与美国贸易争端持续的过程中, 可以适当将进口份额向水和耕地资源利用率较高的国家集中, 如巴西和阿根廷。③ 为避免过度依赖, 应积极开拓多样化进口来源, 适当增加其他南美、东南亚国家和部分非洲国家的大豆进口并加大农业生产投资和扶植; 同时, 中国应当提升国内农业生产力(提高复种指数、高产品种开发), 增加国内大豆产量。④ 从水土资源角度分析供应国大豆生产潜力, 有利于综合评估供应国向中国持续出口大豆的能力以及对水和耕地资源的影响。近20年美国、巴西向中国出口的大豆量呈增加趋势^[31], 预计未来2~3年内, 两国将持续向中国供应大豆, 且大豆面积可能持续扩张。由此可见, 农业布局应充分考虑国家/地区的水和耕地资源禀赋差异, 适时适量地通过贸易实现资源的优化配置, 实现全球可持续发展。

(2) 中国大豆关税政策调整, 对全球水和耕地资源有不同程度的影响, 采取适当的关税政策, 有利于缓解中国和全球的水和耕地资源压力。例如, 情景4下大豆进口总量最大约6515万t, 相比在中国生产等量大豆, 进口大豆可以减少中国872亿m³水和1438万hm²耕地的消耗量, 相当于2014年全国用水总量的14%(农业用水总量的22%)、全国耕地总面积的11%(《全国水利发展统计公报》^[39]发布了2014年全国用水总量6095亿m³, 其中农业用水总量3869亿m³, 《中国国土资源公报》^[40]发布了2014年全国耕地总面积13506万hm²); 该情景下中国增加从巴西、阿根廷等国的大豆进口(巴西、阿根廷生产单位产量大豆消耗的水和耕地低于其他供应国), 减少了全球水和耕地资源的消耗量。同时, 有利于提升巴西、阿根廷等国的资源利用率以及农业生产技术, 大豆贸易带动了中国对供应国农业生产和基础设施投资^[41-43]。

(3) 受GTAP数据库数据限制, 本文能获取的最新数据年份为2014年, 且基于GTAP静态模型模拟所得结果也仅代表2014年社会经济水平下的模拟结果。虽然无法将此结果与2018年的实际中国大豆进口数据进行对比, 但是基于GTAP模型的相同数据源^[32], 本文对比了中国对美国大豆加征25%关税前后的情况, 即对比了2017年、2018年中国从美国进口的大豆量(分别为3258万t、1644万t), 发现2018年(中国对美国大豆加征25%进口关税后)中国从美国进口的大豆量比2017年(中国对美国大豆加征25%进口关税之前)减少了近50%。这与本文基于2014年GTAP数据的模拟结果相近(中国对美国大豆加征25%关税后, 中国从美国进口的大豆量减少了近47%), 且趋势一致。

(4) 大豆贸易生产、运输、加工及消费等全过程的资源环境效应评估, 将是本文后续工作的重点方向, 即选取水、耕地、氮、碳等指标, 结合中国及其主要供应国大豆生产潜力、利用效率等方面, 量化评估大豆贸易全过程对全球资源环境可持续发展的影响, 为保障粮食安全、资源环境可持续发展的科学研究与政策制定提供更全面的信息支撑。

参考文献(References):

- [1] 谢高地, 成升魁, 肖玉, 等. 新时期中国粮食供需平衡态势及粮食安全观的重构. 自然资源学报, 2017, 32(6): 895-903. [XIE G D, CHENG S K, XIAO Y, et al. The balance between grain supply and demand and the reconstruction of China's food security strategy. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(6): 895-903.]
- [2] ALLAN J A. Virtual water-the water, food, and trade nexus useful concept or misleading metaphor?. *Water International*, 2003, 28(1): 106-113.
- [3] 罗贞礼, 龙爱华, 黄璜, 等. 虚拟土战略与土地资源可持续利用的社会化管理. 冰川冻土, 2004, 26(5): 624-631. [LUO Z L, LONG A H, HUANG H, et al. Virtual land strategy and socialization of management of sustainable utilization of land resources. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(5): 624-631.]
- [4] ZHUO L, HOEKSTRA A Y, WU P, et al. Monthly blue water footprint caps in a river basin to achieve sustainable water consumption: The role of reservoirs. *Pubmed*, 2019, 650(1): 891-899.
- [5] 刘爱民, 莉薛, 成升魁, 等. 我国大宗农产品贸易格局及对外依存度研究: 基于虚拟耕地资源的分析和评价. 自然资源学报, 2017, 32(6): 915-926. [LIU A M, LI X, CHENG S K, et al. A study on the trade and external dependence of agricultural products in China: Analysis and evaluation based on virtual land resources. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(6): 915-926.]
- [6] TUNINETTI M, RIDOLFI L, LAIO F. Charting out the future agricultural trade and its impact on water resources. *Science of the Total Environment*, 2020, 714: 136626.
- [7] 魏怡然, 玲邵, 张宝刚, 等. 北京市虚拟水消费与贸易. 自然资源学报, 2019, 34(9): 1962-1973. [WEI Y R, LING S, ZHANG B G, et al. Virtual water consumption and trade of Beijing. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(9): 1962-1973.]
- [8] 黄培琪, 吴绍华, 李啸天, 等. 中国省际粮食贸易及其虚拟耕地流动模拟. 地理研究, 2016, 35(8): 1447-1456. [BEN P Q, WU S H, LI X T, et al. China's inter-provincial grain trade and its virtual cultivated land flow simulation. *Geographical Research*, 2016, 35(8): 1447-1456.]
- [9] 孙才志, 王中慧. 中国和“一带一路”沿线国家农产品虚拟水贸易的驱动因素. 水利经济, 2020, 38(1): 1-7, 28, 85. [SUN C Z, WANG Z H. Driving factors for virtual water trade of agricultural products between China and countries along "Belt and Road". *Journal of Economics of Water Resources*, 2020, 38(1): 1-7, 28, 85.]
- [10] 王维方, 刘爱民, 强文丽. 中国大豆资源的虚拟土贸易及进口依存度分析. 自然资源学报, 2011, 26(7): 1139-1147. [WANG W F, LIU A M, QIANG W L. Virtual land trades and external dependences of China's soybean resources. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(7): 1139-1147.]
- [11] 金涛. 中国粮食作物种植结构调整及其水土资源利用效应. 自然资源学报, 2019, 34(1): 14-25. [JIN T. The adjustment of China's grain cropping structure and its effect on the consumption of water and land resources. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(1): 14-25.]
- [12] 王秀鹃, 胡继连. 中国粮食虚拟水国际贸易研究: 基于2001—2015年的数据. 山东社会科学, 2018, (2): 117-122. [WANG X J, HU J L. Research on China's virtual water international trade in grain: Based on data from 2001 to 2015. *Shandong Social Sciences*, 2018, (2): 117-122.]
- [13] 王琼. 中国粮食虚拟耕地进口的测度及其影响因素: 基于大豆、玉米、小麦和大米的分析. 财经理论与实践, 2018, 39(3): 134-139, 154. [WANG Q. Research on the measurement of the grain virtual cultivated land import and its impact factors in China: Based on soybean, corn, wheat and rice. *The Theory and Practice of Finance and Economics*, 2018, 39(3): 134-139, 154.]
- [14] 谭圣林, 邱国玉, 熊育久. 投入产出法在虚拟水消费与贸易研究中的新应用. 自然资源学报, 2014, 29(2): 355-364. [TAN S L, QIU G Y, XIONG Y J. New application of the input-output framework in the study of virtual water consumption and trade. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(2): 355-364.]
- [15] 魏小平, 周升起. 农产品贸易中的虚拟资源理论研究进展评述. 齐鲁学刊, 2014, (6): 94-98. [WEI X P, ZHOU S Q. Review on the research progress of virtual resources in the procedure of agricultural products trade. *Qilu Journal*, 2014, (6): 94-98.]
- [16] 安婷莉, 韩昕雪琦, 高学睿, 等. 虚拟水理论发展及应用前景综述. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(2): 44-61. [AN T L, HAN X X Q, GAO X R, et al. A review of the development and application prospect of virtual water theory. *South-to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(2): 44-61.]
- [17] ZHANG C, ANADON L D. A multi-regional input-output analysis of domestic virtual water trade and provincial water footprint in China. *Ecological Economics*, 2014, 100: 159-172.

- [18] 强文丽, 刘爱民, 成升魁, 等. 中国农产品贸易的虚拟土地资源量化研究. 自然资源学报, 2013, 28(8): 1289-1297. [QIANG W L, LIU A M, CHENG S K, et al. Quantification of virtual land resources in China's crop trade. Journal of Natural Resources, 2013, 28(8): 1289-1297.]
- [19] DALIN C, KONAR M, HANASAKI N, et al. Evolution of the global virtual water trade network. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(16): 5989-5994.
- [20] ZHANG J Q, ZHAO N Z, LIU X J, et al. Global virtual-land flow and saving through international cereal trade. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(5): 619-639.
- [21] 国际贸易中心. 国际贸易数据. <http://www.intracen.org/leatherline-portal/market-trends/trade-statistics>, 2020-4-26. [International Trade Centre. International trade datas. <http://www.intracen.org/leatherline-portal/market-trends/trade-statistics>, 2020-4-26.]
- [22] LU F. China-US trade disputes in 2018: An overview. China & World Economy, 2018, 26(5): 83-103.
- [23] CHONG T T-L, LI X Y. Understanding the China-US trade war: Causes, economic impact, and the worst-case scenario. Economic and Political Studies, 2019, 7(2): 185-202.
- [24] 肖志敏, 杨军. 中美大豆贸易摩擦的经济影响及其启示: 基于GTAP模型测算. 农业经济与管理, 2019, (3): 70-78. [XIAO Z M, YANG J. Evaluating the effect of Sino-US soybean trade frictions and the enlightenment: Based on GTAP model. Agricultural Economics and Management, 2019, (3): 70-78.]
- [25] 方意, 和文佳, 荆中博. 中美贸易摩擦对中国金融市场的溢出效应研究. 财贸经济, 2019, 40(6): 55-69. [FANG Y, HE W J, JING Z B. The spillover effects of China-US trade friction on China's financial markets. Finance & Trade Economics, 2019, 40(6): 55-69.]
- [26] 联合国粮食及农业组织. 1996—2017年中国及其主要供应国的大豆贸易数据. <http://www.fao.org/faostat>, 2020-03-28. [Food and Agriculture Organization of the United Nations. Soybean trade datas for China and its major suppliers from 1996 to 2017. <http://www.fao.org/faostat>, 2020-03-28.]
- [27] 王亮, 黄德林. 新时代背景下建立中日韩自贸区的经济影响研究: 基于CGE模型的分析. 经济论坛, 2019, (8): 94-103. [WANG L, HUANG D L. Research on the economic impact of establishing China-Japan-Korea Free Trade Agreement under the background of new era: Analysis based on CGE model. Economic Forum, 2019, (8): 94-103.]
- [28] XIE W, XIONG W, PAN J, et al. Decreases in global beer supply due to extreme drought and heat. Nature Plants, 2018, 4(11): 964-973.
- [29] WU F, GENG Y, ZHANG Y, et al. Assessing sustainability of soybean supply in China: Evidence from provincial production and trade data. Journal of Cleaner Production, 2020, 244: 119006.
- [30] YAO G, HERTEL T W, TAHERIPOUR F. Economic drivers of telecoupling and terrestrial carbon fluxes in the global soybean complex. Global Environmental Change, 2018, 50: 190-200.
- [31] 联合国粮食及农业组织. 2014年中国大豆投入产出数据. <http://www.fao.org/faostat>, 2020-03-28. [Food and Agriculture Organization of the United Nations. Input-output datas of China's soybean in 2014. <http://www.fao.org/faostat>, 2020-03-28.]
- [32] 联合国商品贸易统计数据库. 2014年中国大豆贸易数据. <https://comtrade.un.org>, 2020-04-20. [UN Comtrade database. Soybean trade datas of China in 2014. <https://comtrade.un.org>, 2020-04-20.]
- [33] HORRIDGE M. SplitCom-programs to disaggregate a GTAP sector. Centre of Policy Studies, Monash University, Melbourne, Australia, 2005.
- [34] 欧洲中期天气预报中心. 2013—2014年全球气象数据. <https://www.ecmwf.int>, 2020-02-18. [European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Global Meteorological Datas from 2013 to 2014. <https://www.ecmwf.int>, 2020-02-18.]
- [35] PORTMANN F T, SIEBERT S, DÖLL P. MIRCA2000: Global monthly irrigated and rainfed crop areas around the year 2000: A new high-resolution data set for agricultural and hydrological modeling. Global Biogeochemical Cycles, 2010, 24(1): 1-24.
- [36] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Virtual water trade. Netherlands: National Institute for Public Health and the Environment, 2002.
- [37] ALLEN R G, PEREIRA L S. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Italy: FAO, Water Resources, Development and Management Service, 1998.
- [38] DAVIS K F, RULLI M C, SEVESO A, et al. Increased food production and reduced water use through optimized crop distribution. Nature Geoscience, 2017, 10(12): 919-924..

- [39] 中华人民共和国水利部. 2014年全国水利发展统计公报. <http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb>, 2014-12-31. [Ministry of Water Resources of People's Republic of China. 2014 Statistic bulletin on China water activities. <http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb>, 2014-12-31.]
- [40] 中华人民共和国国土资源部. 2015中国国土资源公报. <http://www.mnr.gov.cn/sj/tjgb>, 2016-04-21. [Ministry of Natural Resources of People's Republic of China. 2015 Statistic bulletin on China land activities. <http://www.mnr.gov.cn/sj/tjgb>, 2016-04-21.]
- [41] LIU J G, HULL V, BATISTELLA M, et al. Framing sustainability in a telecoupled world. *Ecology and Society*, 2013, 18 (2): 26.
- [42] SUN J, MOONEY H, WU W B, et al. Importing food damages domestic environment: Evidence from global soybean trade. *Proceeding of the National Academy of Science of the United States of America*, 2018, 115(21): 5415.
- [43] 孙晶, 刘建国, 杨新军, 等. 人类世可持续发展背景下的远程耦合框架及其应用. *地理学报*, 2020, 75(11): 130-138. [SUN J, LIU J G, YANG X J, et al. Sustainability in the anthropocene: Telecoupling framework and its applications. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(11): 130-138.]

Quantitative assessment of the impact of China's soybean import tariff adjustment on global water and farmland

LIU Hang, SHEN Ge, YANG Jing, WU Wen-bin, SUN Jing

(Key Laboratory of Agricultural Remote Sensing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: International food trade is an important factor affecting food security and environmental sustainability. Soybeans are an important food trade commodity, and the import amount of soybeans has been dramatically affected by the international situation. Since China has become the largest soybean importer, quantitative analysis of the impacts of soybean imports in China on global environment is of great significance, which helps us understand food security and global sustainability, and this is particularly true in the context of China-United States trade disputes. To obtain the soybean import volumes of China from its major suppliers (the United States, Brazil, Argentina, Uruguay, and Canada), we first adopted the GTAP (Global Trade Analysis Project) model and its database, and built four soybean tariff scenarios. Then, we calculated the amount of water and farmland used per ton of soybeans produced in each country, and studied the amount of total virtual water and virtual farmland produced in the four scenarios. The results show that the total imported soybeans and total virtual farmland remained stable, while the total virtual water varied considerably among four scenarios. The total soybean imports, virtual water, and virtual farmland from each supplier varied greatly, and the United States experienced the strongest decrease. Soybean produced in Brazil consumed the least water, while the United States consumed the least arable land. Soybean import of China could improve water and farmland resource efficiency, relieve environmental pressure, and enhance food security.

Keywords: China-United States trade disputes; soybeans; virtual water; virtual farmland; food trade