

引用格式:汪艺晗, 杨谨, 刘其芸, 等. “一带一路”国家粮食贸易下虚拟水和隐含能源流动[J]. 资源科学, 2021, 43(5): 974-986.
[Wang Y H, Yang J, Liu Q Y, et al. Virtual water and embodied energy transfer in grain trade across the countries along the “Belt and Road”[J]. Resources Science, 2021, 43(5): 974-986.] DOI: 10.18402/resci.2021.05.11

“一带一路”国家粮食贸易下虚拟水和隐含能源流动

汪艺晗^{1,2}, 杨 谨¹, 刘其芸¹, 谭 蕊¹, 袁 浩^{1,3}

(1. 中国地质大学(北京)经济管理学院, 北京 100083; 2. 北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 深圳 518055; 3. 商务部国际贸易经济合作研究院, 北京 100710)

摘 要:“一带一路”倡议沿线国家在粮食国际贸易中发挥着日益重要的作用, 研究其粮食贸易带动的虚拟水和灌溉用能流动格局, 能够为“一带一路”区域可持续的农业合作提供理论依据和有力参考。本文基于UN COM-TRADE/FAOSTAT和水价值研究报告的数据, 构建以“一带一路”沿线国家为主的粮食贸易及其隐含虚拟水和灌溉用能的流动网络, 计算网络指标, 并考察各国在网络中的地位和资源流动模式, 分析网络社团结构。结果表明: ①在粮食贸易网络中, 俄罗斯、乌克兰、越南和泰国是虚拟水和灌溉用能出口国, 土耳其、埃及、沙特阿拉伯和以色列是虚拟水和灌溉用能主要进口国。②存在一些粮食出口大国农业资源利用效率不高的现象, 如俄罗斯, 粮食作物灌溉过程消耗大量能源, 粮食贸易会加重其农业用能使用负担, 这表明目前粮食贸易引起的资源再分配情况还有待优化。③研究国家的虚拟水和灌溉用能流动网络已分化出社团结构, “一带一路”沿线各国积极参与粮食国际贸易, 在社团内核心贸易国的辐射带动下, 边缘的发展中国家农业水资源和能源资源短缺的情况能得到一定改善。④非“一带一路”重要粮食贸易国在保障“一带一路”国家粮食需求的同时, 为其提供了大量的虚拟水和灌溉用能资源, 在贸易网络中发挥着至关重要的中介作用。本文认为“一带一路”沿线各国可以考虑通过农业贸易来优化本国农业资源结构, 并加强农业合作, 提高水资源和能源资源的利用率。

关键词:粮食—能源—水关联系统; 粮食贸易; 网络模型; 社团结构; “一带一路”国家

DOI: 10.18402/resci.2021.05.11

1 引言

粮食、能源和水资源是维系社会环境可持续发展的关键因素, 但目前来看, 这3种资源面临着需求快速增长而供应有限的严峻挑战^[1-4]。全球视角看, 到2030年, 人类社会对粮食、能源和水资源的依赖相比2012年将分别增加35%、50%和40%^[5]。世界经济论坛发布的《全球风险报告(第六版)》将“粮食—能源—水系统”风险群作为三大重要风险群之一^[6]。在全球人口增长、环境恶化、资源短缺和气候变化影响加剧的背景下, 三者之间的内在关联和互动关系得到了国际广泛关注^[7-9]。

粮食贸易过程中隐含着一个较为完整的粮食

—能源—水关联系统^[10,11]。农业生产过程中, 种植、收获、运输和食品加工等各个方面都需要水资源的参与^[12-14]。因此, 考虑农产品生产全过程所需要的水资源的“虚拟水”(Virtual Water)概念逐渐得到学界的关注^[15,16]。此外, 在农业用水过程中, 提水灌溉会导致化石能源的使用和消耗, 现代化的灌溉区每年的能源消耗通常在600~1600 kW·h/hm²之间^[17]。粮食贸易会进一步带动粮食生产中消耗的水资源和能源在区域间重新配置^[10]。全球化加速背景下, 进行资源有效配置及环境可持续发展的农业贸易合作对于众多处于经济加速发展阶段而尚未完成产业转型的发展中国家而言意义重大。“一带一路”

收稿日期: 2020-06-30, 修订日期: 2020-09-17

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(71704164); 教育部人文社会科学青年基金项目(17YJC790187); 中国地质大学(北京)基本科研业务费专项(2652018248)。

作者简介:汪艺晗, 女, 浙江舟山人, 硕士研究生, 主要研究方向为资源环境经济与政策。E-mail: wyh980714@163.com

通讯作者:杨谨, 女, 山东临沂人, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为资源环境经济与政策。E-mail: yangjin@cugb.edu.cn

2021年5月

倡议的提出为沿线以农业为主的发展中国家的农产品贸易合作提供了重要的发展机遇^[18,19]。目前,“一带一路”沿线国家农业自然资源禀赋差异性较大,以水资源为例,沿线各国水资源总量呈现“东部丰富,西部匮乏”的格局^[20,21]。自然资源禀赋的差异是这些国家相互发展农产品贸易的比较优势基础^[22]。因此,通过农业贸易优化资源配置,适度缓解农业生产对当地资源禀赋和生态环境造成的压力是“一带一路”沿线国家的共同诉求^[21,23-25]。

从现有研究来看,早期关于粮食—能源—水关联系统的绝大部分研究集中于对关联研究方法学的探索,并已有一部分研究关注到了“一带一路”沿线的相关区域或某些重要国家^[26-28]。基于粮食安全和农业可持续发展的角度,世界粮农组织(FAO)于2014年提出粮食—能源—水耦合决策框架^[29]。一些学者关注于全球气候变化背景下,粮食—能源—水关联系统的演变和发展^[30-32]。例如,Yang^[31]等提出了一个流域水利经济水系模型,用以研究气候变化对南亚布拉马普特拉河流域沿岸国家未来的能源和粮食生产供水的影响。Lee等^[32]采用8种大气环流模型(GCMs)分析了气候变化和灌溉技术变化下1990—2099年韩国水稻的生产力、灌溉需求和能源投入的变化趋势。

在聚焦粮食—能源—水关联系统中的众多研究方法中,网络模型能够从全局上客观地识别和评价交互和关联关系^[33,34]。网络模型是指对由许多节点与节点之间的连边集合所构成的系统进行数学分析的一种方法,其中,节点用来代表真实系统中不同的个体,而边则用来表示个体间的关系^[35]。早期的相关研究主要应用网络模型于研究国际贸易网络的静态指标,如网络度和网络密度等^[36]。之后有一些学者开始使用网络模型探究贸易网络随时间变化的动态演化过程^[37-39]和社团的存在和划分问题^[40-42]。其中,不乏有研究关注到“一带一路”沿线国家的贸易网络^[43-45]。近年来,已经有一部分学者应用网络模型评价粮食—能源—水关联系统,但较少研究关注到包括“一带一路”沿线国家在内的大多数发展中国家^[10,11,46,47]。Covarrubias等^[46]以阿姆斯特丹作为分析案例,研究了该市粮食—能源—水关联系统的网络结构、功能和影响力,发现阿姆斯特丹在粮食、能源和水资源管理领域已经形成了一定

规模的跨部门联系。Mahjabin等^[47]基于网络模型,提出了一种将食品和能源嵌入水资源网络的结构评估方式。由于美国玉米大量用于乙醇生产,他们依据最终用途将玉米分为食品和能源2类,分别考察其网络特征及相关虚拟水网络特征,发现相较于能源贸易网络,食品贸易网络的密集程度更高。在食物和能源虚拟水网络之间,水稀缺节点和水丰富节点之间的水资源流动存在很大差异。Vora等^[11]使用网络模型展示了美国2012年51个州之间29种食品贸易引起的虚拟水、能源和温室气体流动,指出美国的食品贸易网络是一个强大且联系紧密的网络。而食品贸易导致的虚拟水、隐含农业用能和温室气体流动网络中,存在几个关键的州占据着核心的主导地位。

整体而言,粮食—能源—水关联系统的相关研究仍主要聚焦在发达国家,而包括“一带一路”沿线国家在内的发展中国家在粮食国际贸易中发挥着愈发重要的作用。2015年,“一带一路”沿线国家农产品出口额和进口额分别为3747.45亿美元和3763.13亿美元,2010—2015年的年均增长率分别达到4.21%和3.16%^[48]。针对性研究“一带一路”沿线国家的粮食—能源—水关联系统能为这些国家保障粮食安全、优化资源配置提供崭新的视角。此外,网络模型在粮食—能源—水关联系统研究中的应用仍还有待深入,复杂网络在该类研究中的应用能够进一步揭示粮食—能源—水关联系统中各资源网络的路径、特征和关键节点。

综上,本文基于2018年27个“一带一路”沿线国家主要粮食作物的贸易数据,同时考虑5个“一带一路”沿线之外的主要粮食贸易国的影响,计算了粮食贸易中虚拟水流动,分析了“一带一路”沿线国家虚拟水进出口现状,进一步研究了粮食灌溉用能流动,揭示粮食贸易下资源的流动和使用情况。基于主要结论,本文提出了通过粮食贸易调控实现“一带一路”区域水资源及能源资源优化配置的可行方案。分析“一带一路”沿线国家粮食贸易带动的虚拟水和隐含能源流动格局,以此来研究粮食—能源—水关联系统对区域贸易格局和资源配置的影响具有重要意义,能够为“一带一路”区域可持续的农业合作提供理论依据和有力参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与估算

本文所使用的粮食贸易数据来源于联合国统计署(UNSD)商品贸易数据库(COMTRADE)。各国每年向联合国统计署提供商品贸易数据,其中包含每年与各个贸易对象之间各种商品交易往来的数据^[49,50]。如表1所示,本文从UN COMTRADE中选择了2018年32个国家4种粮食产品(水稻、小麦、玉米和谷类制品)的贸易量数据,选择依据如下:首先,根据粮食贸易量的大小,在所有“一带一路”沿线国家中选择了粮食贸易涉及的最主要的27个国家。2018年所选27国的4种粮食产品的贸易总量占“一带一路”沿线所有国家的70.92%^[50]。其次,根据粮食贸易量大小选取了5个在粮食国际贸易中扮演重要角色的非“一带一路”国家,包括美国、日本、澳大利亚、巴西和印度。由于这些国家和“一带一路”国家之间存在紧密的粮食贸易往来,考虑这些国家能够使得本文对“一带一路”国家粮食贸易所引起的虚拟水流动和灌溉用能流动网络结构和社团划分的分析更加合理。

表2展示了本文所选取的4种粮食产品在UN COMTRADE中对应的海关HS编码。将UN COMTRADE和国际贸易中心数据库(International Trade Centre)以及联合国农业及粮食组织数据库(FAO-STAT)进行比对,发现International Trade Centre和FAOSTAT的贸易数据不及UN COMTRADE全面精确,因此在核算时以UN COMTRADE的数据为准。另外,本文关于水足迹计算的数据来源于Mekonnen等^[51]撰写的水价值研究报告,对于水足迹系数更新所采用的农作物产量数据和灌溉用能数据来源于FAOSTAT^[52]。由于部分国家灌溉水能耗的数据缺失,本文对照了生产技术和灌溉水平相近的

表1 研究国家选择

Table 1 Countries covered in this study

“一带一路”沿线国家	“一带一路”沿线国家之外的主要粮食贸易国
中国、马来西亚、印度尼西亚、缅甸、泰国、柬埔寨、菲律宾、土耳其、黎巴嫩、沙特阿拉伯、阿联酋、巴基斯坦、孟加拉、俄罗斯、乌克兰、波兰、斯里兰卡、越南、韩国、埃及、新西兰、津巴布韦、肯尼亚、智利、以色列、埃塞俄比亚、南非	美国、日本、澳大利亚、巴西、印度

表2 粮食名称及对应的HS编码

Table 2 Names and HS codes of selected grains

大类编码	大类名称	小类编码	小类名称
1001	小麦及混合麦	100110	硬粒小麦
		100190	除硬粒小麦外的麦子和混合麦
1005	玉米	100510	玉米种子
		100590	除种子外玉米
1006	水稻	100610	带壳的稻谷
		100620	去壳的稻谷
		100630	碾磨过的稻谷
		100640	碎米
1103	谷类制品	110311	小麦制品
		110313	玉米制品
		110314	水稻制品

国家的灌溉水能耗数据,对数据缺失的国家选择以粮食单位产量灌溉耗水量相近的国家的灌溉水能耗数据进行数据替代(马来西亚替代泰国,印度尼西亚代替缅甸,印度代替斯里兰卡)。同时,由于该指标的数据仅更新到2012年,本文假设2012年到2018年间,各国农业灌溉水能耗没有明显变化。根据中国水利统计年鉴,2010年以来,中国机电排灌面积占比变化不到1%,因此该假设具有一定合理性^[53]。

2.2 研究方法

粮食贸易会引起虚拟水在国家间流动配置,虚拟水主要包括3类:蓝水、绿水和灰水(图1)。蓝水是指生产一种产品所消耗(蒸发)的地表水和地下水;绿水是指所消耗的雨水;灰水是指根据现有环境水质标准吸收污染物负荷所需的淡水量^[54]。其中,蓝水多为灌溉用水,灌溉过程中引起了农业部门最主要的能源消耗。本文核算了蓝水流动过程中引起的隐含能源的流动,以考察粮食国际贸易中整个粮食—能源—水关联系统的总体表现。

2.2.1 虚拟水计算

量化粮食贸易隐含虚拟水需要核算作物在生长发育期间所消耗的全部水资源量,一般采用学术界普遍认可的联合国粮农组织(FAO)推荐并修正的标准彭曼公式。Mekonnen等^[51]采用FAO建立的气象数据库(ClimWat)中的气象数据,将各个国家的气象观测数据导入到应用彭曼公式原理建立的GrainWat软件中,计算出每个国家农作物的水足迹量,并撰写了相关研究报告。该报告是目前国际上

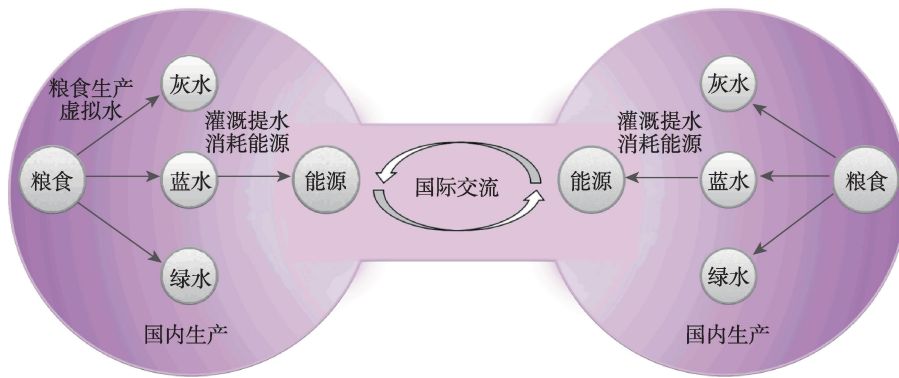


图1 粮食、虚拟水和隐含能源关联关系图

Figure 1 Relationship between grain, virtual water, and embodied energy

对作物需水量较为科学准确的估计。为了计算32个国家粮食贸易过程中隐含的虚拟水流动,我们从该报告中选取了所研究国家农产品的3种水足迹(报告提供的水足迹数据为1996—2005年多年平均值,假设农产品水足迹对应2000年水平),其单位是 m^3/t 。需要特别注意的是,若数据库中数值为0,则表示该国不生产这种农作物,或农作物产量极小,无法对其生产消费环节的虚拟水进行可靠计量,这对本文的计算过程无显著影响。同时,由于生产方式变化和灌溉技术改进等原因,农作物的单位面积产量会逐年提高^[55],进而各国农作物的需水量也会受到相应的影响。Liu等^[56]发现不同作物的水足迹的倒数,即作物水分生产力,和该类粮食的产量有较强的线性关系。本文应用这种规律,对水足迹进行了相应的更新。Tuninetti等^[57]指出农作物水足迹的变化主要受产量变化的驱动,而蒸散作用的影响较小,因此,使用这种方法估算农作物水足迹的变化较为可靠,具体计算公式如下:

$$VWC_{i,c,2018} = VWC_{i,c,2000} \times \frac{Y_{i,c,2000}}{Y_{i,c,2018}} \quad (1)$$

式中: $VWC_{i,c,2018}$ 指*i*国2018年单位*c*产品的虚拟水含量(m^3/t); $VWC_{i,c,2000}$ 指*i*国2000年单位*c*产品的虚拟水含量(m^3/t); $Y_{i,c,2018}$ 指*i*国2018年*c*产品的产量(t); $Y_{i,c,2000}$ 指*i*国2000年*c*产品的产量(t)。

本文基于水价值报告^[51]对所研究的2018年32国粮食国际贸易拉动的虚拟水流动进行科学计量。对于*i*国而言,*c*类粮食产品出口贸易中的虚拟

水流出为该产品出口总量中所包含的虚拟水量,计算公式如下:

$$VWX_{i,c,2018} = VWC_{i,c,2018} \times x_{i,c,2018} \quad (2)$$

式中: $VWX_{i,c,2018}$ 指*i*国2018年单位*c*产品虚拟水出口总量(m^3); $x_{i,c,2018}$ 表示*i*国*c*产品2018年的出口总量(t)。

类似地,*i*国进口贸易中,*c*类粮食产品所包含的虚拟水流入量可表示为该产品出口总量中所包含的虚拟水量。计算公式表示如下:

$$VWM_{i,c,2018} = VWC_{i,c,2018} \times m_{i,c,2018} \quad (3)$$

式中: $VWM_{i,c,2018}$ 代表*i*国2018年*c*产品虚拟水进口总量(m^3); $m_{i,c,2018}$ 表示*i*国2018年*c*产品的进口总量(t)。

从而,针对本文研究的粮食产品,*i*国2018年的虚拟水净流出(VWB_i)可用以下公式表示,

$$VWB_{i,2018} = \sum_c VWX_{i,c,2018} - \sum_c VWM_{i,c,2018} \quad (4)$$

若该值为负,则该国为粮食产品虚拟水净进口国。

2.2.2 灌溉用能计算

粮食生产过程中的能源消耗主要来源于灌溉过程中的提水耗能,因此通过计算各国粮食种植过程中每单位灌溉用水的提水过程所消耗的能源量,进一步估计粮食出口带动的灌溉用水出口隐含的能源出口情况。基于FAOSTAT^[52]中的相关数据计算*i*国单位灌溉水能耗(EC_i),计算公式如下:

$$EC_i = \frac{EI_i}{WI_i} \quad (5)$$

式中: EI_i 代表*i*国粮食生产过程中灌溉提水所消耗

的能源(TJ); WI_i 代表*i*国粮食生产过程中消耗的所有灌溉用水(m^3)。

从而,*i*国2018年粮食产品出口贸易中,灌溉用能出口($EX_{i,c,2018}$,TJ)计算如下:

$$EX_{i,c,2018} = VWX_{i,c,2018} \times EC_i \quad (6)$$

类似地,*i*国2018年进口*c*产品的灌溉用能进口(EM_c^i ,TJ)计算如下:

$$EM_{i,c,2018} = VWM_{i,c,2018} \times EC_i \quad (7)$$

从而,针对本文研究的粮食产品,*i*国2018年灌溉用能净流出(EB_i ,TJ)可用以下公式表示:

$$EB_i = \sum_c EX_{i,c,2018} - \sum_c EM_{i,c,2018} \quad (8)$$

若该值为负,则该国为粮食产品灌溉用能净进口国。

2.2.3 网络模型构建及相关指标计算

为了进一步研究以“一带一路”国家为主的粮食贸易国的粮食贸易及其带来的虚拟水和灌溉用能流动,本文构建了粮食、虚拟水和灌溉水能耗的网络。网络模型包括节点*V*和边*E*,其中, $V=\{v_z: z=1, 2, \dots, n_1\}$, n_1 是节点的数量。 $E=\{e_z: z=1, 2, \dots, n_2\}$, n_2 是边的数量。本文的贸易网络模型中,每个节点代表一个国家,节点之间的边是各贸易参与国之间的粮食贸易往来、虚拟水流动或灌溉用能流动。由于各个国家之间贸易和资源流动量差异巨大,为了揭示网络的性质和各个国家地位关系的全貌,需要考虑权重对于网络的影响。本文将网络模型中边的权值设定为相对应的贸易额和流动额。用Gephi软件计算出各类粮食及虚拟水和隐含能源所构成的网络的特征指标,分析粮食—能源—水关联系统各资源网络中社团的存在和分布,探索各个国家节点在网络中扮演的角色和发挥的作用。

本文引入了Blondel等设计的基于模块度的社团划分算法分析国家间的粮食贸易引起的水资源和能源流动的网络结构。模块度是目前常用的一种衡量网络社区结构强度的方法^[45]。模块度值的大小主要取决于网络中节点的社区分配,可以用来定量衡量网络社区划分质量,其值越接近1,表示网络划分出的社区结构的强度越强,也就是划分质量越好。模块度的大小为社区内部的总边数和网络中总边数的比例减去一个期望值,该期望值是将网络设定为随机网络时,同样的社区分配所形成的社区

内部的总边数与网络中总边数的比例的大小,具体计算公式如下:

$$Q = \frac{1}{2s} \sum_{jl} [W_{jl} - \frac{A_j A_l}{2s}] \times \delta(c_j, c_l) \quad (9)$$

式中: Q 代表模块度; W_{jl} 表示点*j*与点*l*之间的边的权重。 A_j 为点*j*的所有边的权重之和; A_l 为点*l*的所有边的权重之和; c_j 为点*j*所在的社团, c_l 为点*l*所在的社团,如果点*j*和*l*在同一个社团,那么 $c_j = c_l$, $\delta(c_j, c_l) = 1$,反之, $\delta(c_j, c_l) = 0$; $s = 1/2 \sum_{jl} W_{jl}$ 。

为了更好地研究各网络中节点的属性,本文引入了紧密中心性和中介中心性的概念。紧密中心性是指某一节点到其他所有节点距离的平均值的倒数,能够衡量某个节点到达其他节点的难易程度^[59]。对于一个节点,它距离其他节点越近,那么它的紧密中心性越大。紧密中心性的具体计算公式如下:

$$C(j) = \frac{I_j}{\sum_{j \neq l} d_{jl}} \quad (10)$$

式中: $C(j)$ 指节点*j*的紧密中心性; I_j 指节点*j*和其他节点的连接数; d_{jl} 指节点*j*到节点*l*的距离。

中介中心性是以经过某个节点的最短路径数目来刻画节点重要性的指标^[62],中介中心性的计算公式如下:

$$G(v) = \sum_{j \neq v \neq l} \frac{\partial_{jl}(v)}{\partial_{jl}^t} \quad (11)$$

式中: $G(v)$ 是指节点*v*的中介中心性; ∂_{jl}^t 表示节点*j*到节点*l*的最短路径总量; $\partial_{jl}(v)$ 表示节点*j*到节点*l*的最短路径中经过节点*v*的数量。

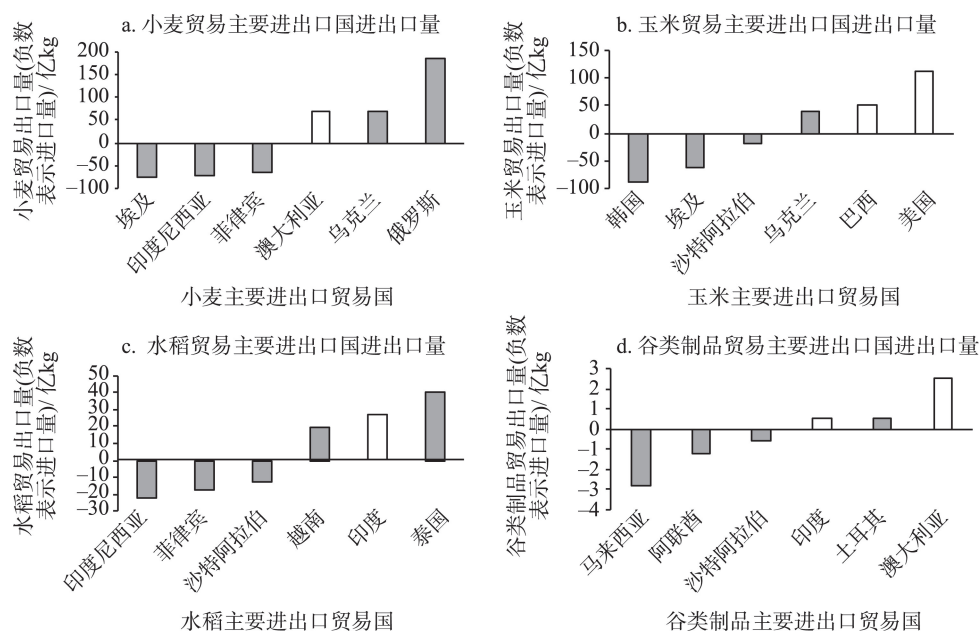
3 结果与分析

3.1 “一带一路”沿线国家粮食贸易概况

本文选取了2018年以“一带一路”沿线国家为主的主要粮食贸易国间贸易量最大的4种粮食产品(小麦、玉米、水稻和谷类制品)作为研究对象(图2),根据UN COMTRADE数据显示,2018年这4种粮食产品的贸易总量在选取国家的所有粮食产品贸易总量中占比66.68%^[53]。各国的粮食进出口量与各国的粮食生产、饮食结构和贸易壁垒等因素息息相关。

小麦是一种在全球范围内广泛种植的粮食作物,国际贸易程度较高。“一带一路”国家中,俄罗斯

2021年5月



注:图中灰色柱体表示该国属于“一带一路”国家,白色柱体表示该国为“一带一路”国家以外的主要粮食贸易国。

图2 2018年主要粮食贸易进出口国贸易量

Figure 2 Trade volumes of major grain importers and exporters, 2018

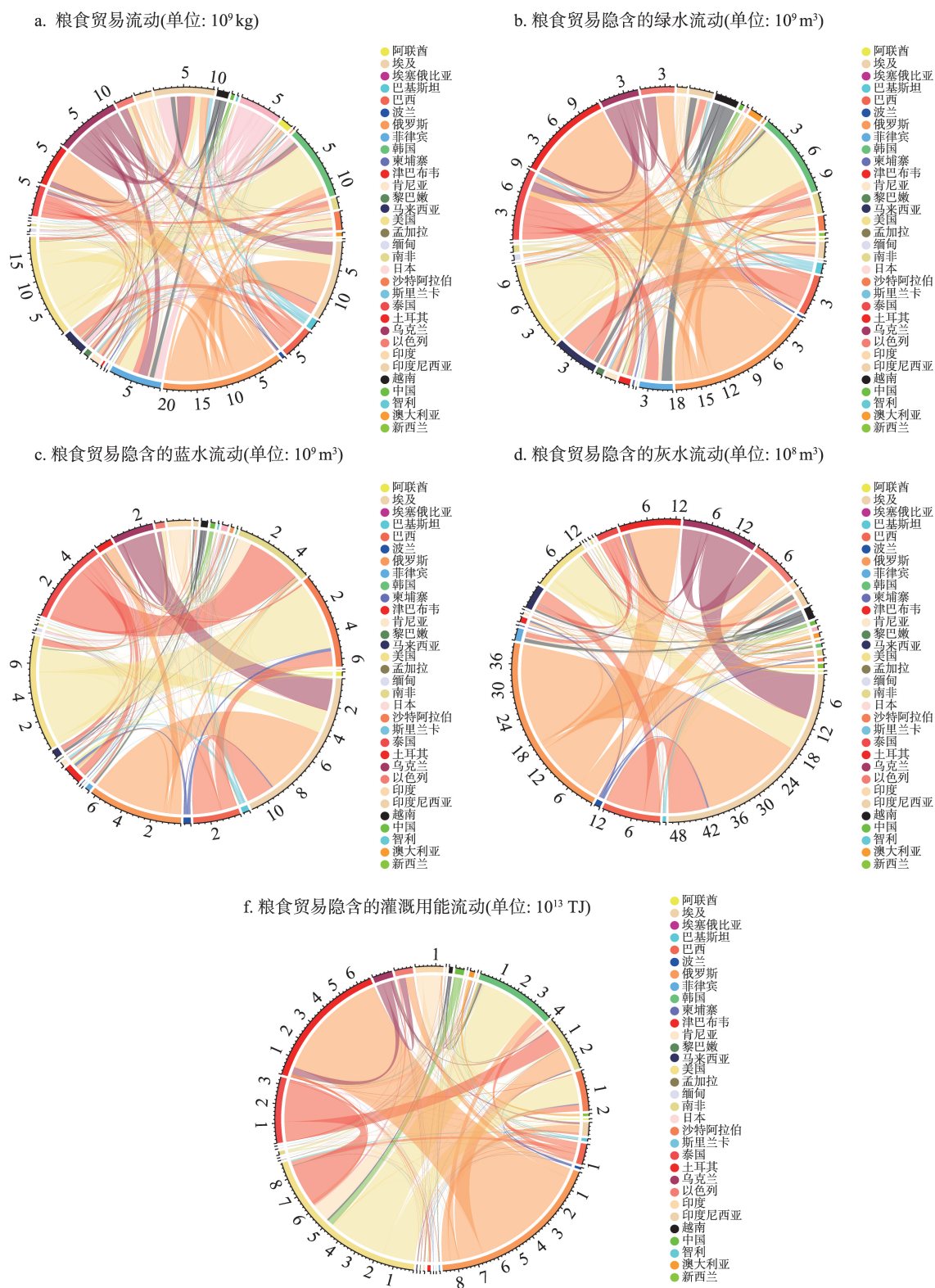
和乌克兰是最主要的小麦出口国,其中,俄罗斯向其他国家共计出口了184.81亿kg小麦。埃及、印度尼西亚和菲律宾是最主要的小麦进口国,这3个国家2018年从其他国家分别进口了76.57亿kg、73.39亿kg和63.44亿kg小麦。从玉米贸易来看,“一带一路”国家中,乌克兰是最主要的玉米出口国,2018年向其他国家出口了39.28亿kg玉米。韩国、埃及和沙特阿拉伯是前三大玉米进口国,2018年分别从其他国家进口玉米87.58亿kg、62.87亿kg和18.21亿kg。水稻的主产区集中在亚洲地区,“一带一路”国家中,泰国和越南是世界范围内的水稻出口大国,2018年向其他国家出口水稻40.33亿kg和19.19亿kg。印度尼西亚、菲律宾和沙特阿拉伯是最主要的水稻进口国。尽管印度尼西亚和菲律宾自身均有较多的水稻产量,但庞大的人口数量以及以水稻为主食的饮食习惯造就了庞大的消费量,使其水稻需求与国内供给仍有缺口,进口需求依然存在。另外,“一带一路”国家中,土耳其是谷类制品最主要的出口国,向其他国家出口了0.56亿kg谷类制品;马来西亚、阿联酋和沙特阿拉伯是谷类制品的最主要进口国,分别从其他国家进口谷类制品2.78亿kg、1.25亿kg和0.58亿kg。

本文考虑的非“一带一路”国家中存在多个重要的粮食出口大国,为“一带一路”国家的粮食供给提供重要保障。其中,美国和巴西是主要的玉米出口国,分别出口玉米111.71亿kg和52.67亿kg;澳大利亚是主要的小麦和谷类制品出口国,分别出口小麦和谷类制品68.56亿kg和2.49亿kg;印度则是主要的水稻出口国,出口水稻27.32亿kg。这些重要国家与“一带一路”国家之间的贸易也会对“一带一路”国家的粮食供需结构以及潜在的资源进出口结构产生深远的影响。

3.2 粮食贸易引起的虚拟水及隐含灌溉用能流动

从虚拟水流动总量来看,“一带一路”国家中,俄罗斯、乌克兰和泰国等主要粮食出口国家是粮食贸易虚拟水出口量最大的国家;而土耳其、埃及、沙特阿拉伯和以色列等粮食进口国是粮食贸易虚拟水进口量最大的国家(图3)。

细分虚拟水种类看,“一带一路”国家中,绿水的主要出口国包括俄罗斯、泰国和乌克兰。这3个国家与其他国家的粮食贸易分别带动了 $1.81 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 、 $5.90 \times 10^9 \text{ m}^3$ 和 $4.72 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的绿水出口量。其中,俄罗斯雨水资源相当丰富,因此出口的粮食产品中包含着丰富的雨水资源,绿水出口量占据绿水



注:图中不同颜色代表网络中不同的国家,来自每个国家的粮食、虚拟水或灌溉用能流出量用与国家颜色相同的线条表示,和每个节点线条的粗细代表流动量的大小。和每个国家连接的与之颜色相同的线条代表该国家的粮食出口贸易和农业水资源和灌溉用能资源流出情况,和每个国家连接的与之颜色不同的线条代表该国家的粮食进口贸易和农业水资源和灌溉用能资源流入情况(不包括每个国家流向自己的流量)。

图3 粮食贸易隐含虚拟水及灌溉用能流动网络

Figure 3 Networks of grain trade, virtual water transfer, and embodied energy transfer

2021年5月

出口国绿水出口总量的33.76%。绿水的主要进口国包括土耳其、韩国和马来西亚。这3个国家的粮食贸易分别带动了 $1.15 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 、 $1.06 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 和 $5.45 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的绿水进口量。由于对水资源重要性的认知差异、生产技术差异和土地资源差异等原因的存在,有些富水国家没能有效地使其丰富的农业水资源参与到国际贸易中来。例如马来西亚,尽管雨水资源丰富,但它仍是绿水进口国。

蓝水来看,俄罗斯和泰国是蓝水主要出口国,蓝水出口量分别达 $6.32 \times 10^9 \text{ m}^3$ 和 $5.73 \times 10^9 \text{ m}^3$,分别占蓝水出口国蓝水总出口量的21.68%和19.67%。在“一带一路”区域粮食贸易进程加速的背景下,这两个国家将通过粮食出口为其他沿线国家提供更多的蓝水资源。埃及、沙特阿拉伯和南非是“一带一路”国家中的蓝水主要进口国。通过粮食贸易,这些国家分别进口了 $1.12 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 、 $6.53 \times 10^9 \text{ m}^3$ 和 $5.39 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的蓝水资源,分别占蓝水进口国蓝水进口总量的38.33%、22.41%和18.34%。这些国家均地处沙漠,受限于地理位置和气候影响,粮食种植条件差,产量低,且这些国家自身的水资源保有量少,粮食进口能够有效缓解本国粮食和水资源紧缺的现状,弥补资源缺口。

粮食生产过程中的灰水主要来源于化肥的投入使用,灰水出口意味着伴随着粮食出口,出口国为进口国承担了相当一部分的农业部门的污水负担。“一带一路”国家中,灰水出口国主要包括俄罗斯和乌克兰,这两个国家与其他国家的粮食贸易分别带动了 $4.05 \times 10^9 \text{ m}^3$ 和 $1.61 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的灰水出口量,分别占灰水出口国灰水出口总量的43.61%和17.30%。灰水的前三大进口国包括埃及、土耳其和以色列。其中埃及的灰水进口量最大,达 $5.01 \times 10^9 \text{ m}^3$,占灰水出口国灰水总进口量的53.84%。

进一步地,我们计算了粮食贸易隐含灌溉用能流动。结果表明,虚拟水出口大国俄罗斯和泰国依然是灌溉用能出口大国。这两个国家通过粮食贸易分别对外出口了 $8.76 \times 10^{13} \text{ TJ}$ 和 $3.37 \times 10^9 \text{ TJ}$ 能源,分别占灌溉用能出口国能源总出口量的40.24%和15.46%。俄罗斯和泰国作为粮食生产大国,拥有成熟的农业生产技术,灌溉条件和充沛的农业能源资源,其对其他沿线国家的粮食出口在一定程度上能缓解农业能源资源有限的国家的农业用能压力。

土耳其、韩国、南非和沙特阿拉伯等虚拟水进口大国也是主要的灌溉用能进口大国,这些国家通过粮食贸易分别进口了 $6.51 \times 10^{13} \text{ TJ}$ 、 $4.07 \times 10^{13} \text{ TJ}$ 、 $2.82 \times 10^{13} \text{ TJ}$ 和 $2.07 \times 10^{13} \text{ TJ}$ 的灌溉用能。此外,综合分析虚拟水进出口和灌溉用能进出口结构之间的变化和联系可以发现:部分农业生产大国的农业能源资源管理仍有改善空间。例如俄罗斯,在粮食贸易导致的蓝水出口占蓝水出口国总出口量的21.68%的情况下,其灌溉用能出口量占灌溉用能出口国总出口量的比例达到了40.24%,这说明农业用能水平还有待提高。鉴于本文考虑的非“一带一路”国家在与“一带一路”粮食贸易中主要扮演的是粮食出口者的角色,粮食出口过程中,这些国家也为“一带一路”国家提供了大量的虚拟水和灌溉用能资源,缓解了“一带一路”地区粮食需求增长和农业发展所面临的资源压力。绿水来看,美国和巴西通过粮食贸易为“一带一路”沿线提供了充沛的绿水资源,这两个国家分别向其他国家出口了 $1.05 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 和 $4.96 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的绿水。蓝水来看,美国通过粮食贸易为“一带一路”国家提供了丰富的农业蓝水资源,其蓝水出口总量达 $7.11 \times 10^9 \text{ m}^3$,占蓝水出口国蓝水总出口量的24.41%。灰水层面,巴西通过粮食贸易,为其他国家提供了 $1.23 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的灰水资源,占灰水出口国灰水出口总量的13.30%。灌溉用能层面,美国也通过粮食出口承接了相当一部分“一带一路”国家的农业用能压力,美国共计出口了 $4.74 \times 10^{13} \text{ TJ}$ 灌溉用能,占灌溉用能出口国能源总出口量的21.75%。

3.3 基于网络视角的粮食—能源—水关联系统分析

使用Gephi软件分析粮食、虚拟水和隐含灌溉用能网络特征和结构,进一步揭示各国之间粮食—能源—水关联系统的联系(表3)。结果显示,粮食贸易引起的虚拟水和隐含灌溉用能网络中,社团的分化和节点国家所处的地理位置联系密切,绿水网络、蓝水网络和隐含灌溉用能网络的分化程度较高,社团的独立性较好,“小世界”效应明显。

鉴于蓝水的网络变化进一步指引了灌溉用能网络的变化,以蓝水网络为例,分析32个国家粮食贸易带动的虚拟水流动网络结构。目前蓝水网络分化出4大社团。第一社团包括印度尼西亚、马来

表3 粮食—能源—水关联系统的网络分析

Table 3 Network analysis of the food-energy-water system

	粮食网络	绿水网络	蓝水网络	灰水网络	隐含灌溉用能网络
模块度	0.31	0.50	0.47	0.21	0.38
第一社团占比/%	40.62	40.62	50.00	40.62	59.38
第二社团占比/%	28.12	28.12	21.88	28.12	34.38
第三社团占比/%	25.00	18.75	18.75	15.62	6.25
第四社团占比/%	6.25	12.50	9.38	15.62	—

西亚、埃塞俄比亚、肯尼亚、南非、津巴布韦、菲律宾、澳大利亚、缅甸、柬埔寨、越南、印度、泰国、斯里兰卡、巴基斯坦和阿联酋 16 个国家,这些国家主要分布在亚洲和非洲地区。该社团内的蓝水进出口活动占整个网络活动的 50.00%。社团内的“一带一路”国家中,南非和肯尼亚的紧密中心性分别为 0.78 和 0.65,是该社团中和其他国家联系最为紧密的两个国家。另外,阿联酋、柬埔寨、斯里兰卡和越南的紧密中心性为 0,这说明它们与其他节点的联系还有待加强。该社团中南非的中介中心性最强,达到 88.64,这是由于其是非洲各国与世界其他地区进行商贸往来的重要桥梁国家。第二社团包含了孟加拉、以色列、新西兰、智利、美国、波兰和沙特阿拉伯 7 个国家,贡献了 21.88% 的蓝水活动体量。第二社团的“一带一路”国家中,沙特阿拉伯和智利的紧密中心性分别为 0.67 和 0.63,为这个社团的蓝水活动作出了主要贡献。另外,孟加拉的紧密中心性为 0.31,与网络中其他节点的互动较差,资源交流现状还有待优化。这个社团中,智利的中介中心性较高,达到 62.27。第三社团的活动体量在整个网络中占比为 18.75%,与第二社团相差不大。第三社团主要包含巴西、黎巴嫩、埃及、俄罗斯、乌克兰和土耳其。第三社团中各节点的紧密中心性和中介中心性相对较低,未来有待进一步提高。蓝水第四社团包括日本、韩国和中国,社团内蓝水交流占据了 9.38% 的蓝水活动体量。非“一带一路”国家分布在蓝水各个社团,它们和所在社团中的其他国家联系紧密,且在社团中发挥重要的中介作用。其中比较有代表性的中介国家是美国和日本。美国在第二社团中的中介中心性达到 51.20,日本在第四社团的中介中心性达到 75.30。

灌溉用能网络目前分化出 3 个社团,第一社团占比高达 59.38%,占据绝对领先的地位。第一社团

包含 19 个国家(阿联酋、巴西、美国、斯里兰卡、泰国、印度、中国、巴基斯坦、韩国、日本、越南、柬埔寨、缅甸、菲律宾、孟加拉、印度尼西亚、沙特阿拉伯、津巴布韦和马来西亚)。其中,韩国、菲律宾和沙特阿拉伯是该社团紧密中心性较高的“一带一路”国家,紧密中心性分别达 0.69、0.67 和 0.67,在所有节点中排名前 3。这些国家与网络中其他国家的粮食贸易充分交换了农业用能资源,实现了资源优化配置。第一社团中也存在紧密中心性较低的国家,例如埃塞俄比亚、孟加拉和越南等,但在紧密中心性高的国家的带领下,这些国家能够进一步加快与其他国家农业用能资源交换的速度和体量。另外,韩国、泰国和菲律宾是第一社团中重要的桥梁国家,中介中心性较高,分别为 48.14、34.92 和 18.87。第一社团中,非“一带一路”国家的美国、巴西、印度和日本与其他“一带一路”国家之间农业用能交换密切。第二社团包含 11 个国家(埃及、波兰、俄罗斯、土耳其、乌克兰、智利、南非、肯尼亚、埃塞俄比亚、黎巴嫩和以色列),贡献了 34.38% 的活动体量。南非、肯尼亚和土耳其在该社团中紧密中心性最高,分别达 0.72、0.69 和 0.60。智利、俄罗斯和南非的中介中心性最高,分别达 64.59、38.94 和 38.61。第三社团包括位于大洋洲的新西兰和“一带一路”倡议外的农业大国澳大利亚。整体社团活动占整个网络的 6.25%。在灌溉用能网络的几大社团中,非“一带一路”国家仍和社团中其他国家联系紧密,印度、巴西、澳大利亚、美国和日本的紧密中心性分别达到 0.77、0.75、0.65、0.65 和 0.60,在各自存在的社团中保持较为强势的地位。未来伴随着国际粮食贸易的进一步发展,目前隐含灌溉用能网络这种“大国抱团”的格局需要被打破和重塑,这样才能使得农业用能资源在世界范围内进行更加合理的优化配置,充分发挥各国的比较优势。

2021年5月

4 结论与建议

4.1 主要结论

本文聚焦“一带一路”合作倡议,基于目前的粮食多边贸易格局,量化粮食贸易隐含的虚拟水和灌溉用能流动情况,并采用Gephi构建网络模型,研究贸易带动的粮食—能源—水关联系统,探索资源配置现状和未来发展方向。本文得出以下主要结论:

(1)粮食贸易带动了虚拟水和灌溉用能的流动和重新配置,包括俄罗斯、乌克兰、越南和泰国等国家在内的主要粮食出口国是虚拟水和灌溉用能主要出口国。这些国家农业用水和用能资源丰富,由这些国家的粮食出口带动的隐含水资源和能源流动能够发挥它们在粮食生产过程中的比较优势,优化资源配置。土耳其、埃及、沙特阿拉伯和以色列等主要粮食进口国是虚拟水和灌溉用能进口国。这些国家往往水资源保有量少,农业用能利用效率不高,通过粮食进口来进口农业用水和用能资源能够有效缓解这些国家的农业资源使用负担。

(2)存在一些农业生产大国农业资源利用效率不高的现状。例如俄罗斯,粮食作物灌溉过程消耗大量能源,在粮食贸易导致的蓝水出口占总出口量的21.68%的情况下,其灌溉用能出口量达到了40.24%。这说明粮食贸易在一定程度会加重其农业用能使用负担,也表明目前粮食贸易拉动的资源再分配情况还有待优化。

(3)通过网络指标计算,本文认识到目前“一带一路”国家的粮食—能源—水关联系统中,绿水、蓝水和灌溉用能网络中已分化出了相对独立的小社团,“小世界”效应明显。“一带一路”沿线各国积极参与粮食国际贸易,在社团内核心贸易大国的辐射带动下,边缘的发展中国家能够更加积极地和其他国家进行农业用水用能资源的互换,以优化区域资源禀赋配置。

(4)本文考虑的非“一带一路”重要粮食贸易国在保障“一带一路”国家粮食需求的同时,为“一带一路”国家提供了大量的虚拟水和灌溉用能资源,缓解了这些国家粮食需求增长和农业发展所面临的农业资源压力。目前非“一带一路”国家在网络中仍保持较为强势的地位,与“一带一路”国家保持着较为紧密的联系,同时发挥着至关重要的中介作用,未来伴随着国际贸易的进一步发展,资源交流

局限在几个大国之间的现状有望被打破。

由于可获取数据的局限性,本文假设2012年到2018年间,各国农业灌溉水能耗没有明显变化。此假设可能影响整体计算结果的准确性。本文仅考虑了静态的2018年粮食贸易情况,未能从动态的时间维度分析粮食贸易结构的变化,以及其拉动的虚拟水和灌溉用能流动的变化规律。这也是下一步研究值得探索的方向。

4.2 政策建议

针对本文的研究结果,我们提出了以下几点具体的政策建议:

(1)“一带一路”沿线各国需要在一定程度上提高自身粮食国际贸易参与度,积极促进粮食贸易结构多元化。例如泰国、缅甸和柬埔寨等拥有丰富的自然资源得以进行粮食生产的国家,可以进一步通过合作改善农业基础设施,革新农业技术,提高产能,在粮食贸易中占有更多优势。而阿联酋、沙特阿拉伯和以色列等粮食进口国可以继续寻找更多的贸易伙伴,减少对单一国家的粮食依赖度,实现粮源多元化。

(2)农业生产水资源和能源资源较为丰富的国家应该进一步提高对于生产资源节约的重视程度。根据本文的结果,例如俄罗斯,其农业灌溉用能就存在进一步节约的潜力。此外,“一带一路”各国都应当加大对技术开发的投入,学习先进国家的经验,使用高效的灌溉措施,以提高农业生产中的水资源和能源资源的利用效率。技术水平落后的国家可以向农业灌溉技术先进的国家,学习相关发展经验。

(3)“一带一路”农业区域一体化进程亟待加速。农业区域一体化的形成能够产生庞大的规模效应,优化农业生产结构和区域布局,引导农业资源要素更加高效合理地配置。建议针对各个国家的农业发展水平、贸易互补性和市场需要潜力,积极推进相关优惠贸易协调与谈判,消减贸易保护主义,探索农业区域一体化发展的新模式。

参考文献(References):

- [1] Cansino-Loeza B, Ponce-Ortega J M. Sustainable assessment of water-energy-food nexus at regional level through a multi-stakeholder optimization approach[J]. Journal of Cleaner Production,

- 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125194.
- [2] Di Martino M, Avraamidou S, Cook J, et al. An optimization framework for the design of reverse osmosis desalination plants under food-energy-water nexus considerations[J]. *Desalination*, 2021, DOI: 10.1016/j.desal.2021.114937.
 - [3] Yuan M H, Chiueh P T, Lo S L. Measuring urban food-energy-water nexus sustainability: Finding solutions for cities[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141954.
 - [4] Yue Q, Guo P. Managing agricultural water-energy-food-environment nexus considering water footprint and carbon footprint under uncertainty[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, DOI: 10.1016/j.agwat.2021.106899.
 - [5] Burrows M. *Global Trends 2030: Alternative Worlds*[R]. Washington: NIC, 2012.
 - [6] World Economic Forum. *Global Risks 2011 Report (6th ed.)*[R]. Cologne: World Economic Forum, 2011.
 - [7] Niet T, Arianpoo N, Kuling K, et al. Embedding the United Nations sustainable development goals into energy systems analysis: Expanding the food-energy-water nexus[J]. *Energy Sustainability and Society*, 2021, DOI: 10.21203/rs.3.rs-52249/v2.
 - [8] Hogeboom R J, Borsje B W, Deribe M M, et al. Resilience meets the water-energy-food nexus: Mapping the research landscape[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, DOI: 10.3389/fenvs.2021.630395.
 - [9] D'odorico P, Davis K F, Rosa L, et al. The global food-energy-water nexus[J]. *Reviews of Geophysics*, 2018, 56(3): 456-531.
 - [10] Vora N, Fath B D, Khanna V. A systems approach to assess trade dependencies in US food-energy-water nexus[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(18): 10941-10950.
 - [11] Vora N, Shah A, Bilec M M, et al. Food-energy-water nexus: Quantifying embodied energy and GHG emissions from irrigation through virtual water transfers in food trade[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2017, 5(3): 2119-2128.
 - [12] Okola I, Omulilo E O, Ochieng D O, et al. A Multiobjective Optimization Approach for Sustainable Resource Consumption and Production in Food-Energy-Water Nexus[C]. 2019 IEEE Africon, 2019.
 - [13] Qi X X, Li J C, Yuan W H, et al. Coordinating the food-energy-water nexus in grain production in the context of rural livelihood transitions and farmland resource constraints[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2021, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105148.
 - [14] Sridharan V, Shivakumar A, Niet T, et al. Land, energy and water resource management and its impact on GHG emissions, electricity supply and food production: Insights from a Ugandan case study[J]. *Environmental Research Communications*, 2020, DOI: 10.1088/2515-7620/abaf38.
 - [15] Ioris A A R, Merrett S, Allan T. Virtual water in an empty glass: The geographical complexities behind water scarcity[J]. *Water International*, 2004, 29(1): 119-121.
 - [16] 刘宝勤, 封志明, 姚治君. 虚拟水研究的理论、方法及其主要进展[J]. *资源科学*, 2006, 28(1): 120-127. [Liu B Q, Feng Z M, Yao Z J. Theory, method and progress on virtual water research[J]. *Resources Science*, 2006, 28(1): 120-127.]
 - [17] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). *Protocolo De Auditoría Energética En Comunidades de Regantes* [R]. Spain: Turismo y Comercio, 2008.
 - [18] Yang G, Jiang Y, Zhu X L. Development Proposals about China-ASEAN Agricultural Cooperation Under "Belt and Road" Initiative[C]. *Proceedings of the 2016 International Symposium on Business Cooperation and Development*, 2016.
 - [19] 别诗杰. 中国与“一带一路”国家农产品贸易网络结构及其影响因素分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019. [Bie S J. Analysis on Trade Network Structure of Agricultural Products between China and Countries along "The Belt and Road" and its Influencing Factors[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019.]
 - [20] 杨艳昭, 封志明, 孙通, 等. “一带一路”沿线国家水资源禀赋及开发利用分析[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(6): 1146-1156. [Yang Y Z, Feng Z B, Sun T, et al. Water resources endowment and exploitation and utilization of countries along the Belt and Road[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(6): 1146-1156.]
 - [21] Xu Y, Hu Y L, Gu Q Y, et al. Research on Agricultural Product Trade Patterns, Structures and Comparative Advantages between China and Countries along Silk Road Economic Belt[C]. 2018 International Conference on E-Commerce and Contemporary Economic Development (ECED 2018), 2018.
 - [22] 郭黎霞, 欧阳芳, 闫玄. 中国与“一带一路”沿线国家农产品贸易增长路径探讨: 基于命运共同体理念的分析[J]. *农村经济与科技*, 2020, (16): 67-69. [Guo L X, Ouyang F, Yan X. Discussion on the growth path of agricultural trade between China and "The Belt and Road" countries[J]. *Rural Economy Science-Technology*, 2020, (16): 67-69.]
 - [23] 张芸, 张斌. 农业合作: 共建“一带一路”的突破口[J]. *农业经济*, 2016, (8): 3-5. [Zhang Y, Zhang B. Agricultural cooperation: Jointly building a breakthrough in the "Belt and Road Initiative" [J]. *Agricultural Economy*, 2016, (8): 3-5.]
 - [24] 王恒, 王征兵. “一带一路”背景下中国与中亚五国农业合作研究[J]. *中国集体经济*, 2021, (5): 167-168. [Wang H, Wang Z B. Research on agricultural cooperation between China and five Central Asian countries under the background of "The Belt and Road" [J]. *China Collective Economy*, 2021, (5): 167-168.]
 - [25] Wang R, Dai L L. A Study on Agricultural Trade Flow and Influence between China and the Silk Road Economic Belt Countries: Based on Gravity Model[C]. *Proceedings of 2015 International Symposium, Open Economy & Financial Engineering*, 2015.
 - [26] Daher B T, Mohtar R H. Water-energy-food (WEF) nexus tool 2.0: Guiding integrative resource planning and decision-making

2021年5月

- [J]. *Water International*, 2015, 40(5): 748–771.
- [27] Bazilian M, Rogner H, Howells M, et al. Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach [J]. *Energy Policy*, 2011, 39(12): 7896–7906.
- [28] De Strasser L, Annukka L, Howells M, et al. A methodology to assess the water energy food ecosystems nexus in Transboundary River Basins[J]. *Water*, 2016, 8(2): 59–59.
- [29] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). The Water–Energy–Food Nexus: A New Approach in Support of Food Security and Sustainable Agriculture[R]. Rome: FAO, 2014.
- [30] Damerau K, Patt A G, Van Vliet O P R. Water saving potentials and possible trade-offs for future food and energy supply[J]. *Global Environmental Change*, 2016, DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.03.014.
- [31] Yang Y C E, Ringler C, Brown C, et al. Modeling the agricultural water–energy–food nexus in the Indus River Basin, Pakistan[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2016, DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000710.
- [32] Lee S H, Choi J Y, Hur S O, et al. Food–centric interlinkages in agricultural food–energy–water nexus under climate change and irrigation management[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2020, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105099.
- [33] Garcia D J, You F Q. Including agricultural and organic waste in food–water–energy–waste nexus modelling and decision–making [J]. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2018, 43: 1475–1480.
- [34] Ercsey–Ravasz M, Toroczkai Z, Lakner Z, et al. Complexity of the international agro–food trade network and its impact on food safety [J]. *Plos One*, 2012, DOI: 10.1371/journal.pone.0037810.
- [35] Yang S. Networks: An introduction[J]. *Journal of Mathematical Sociology*, 2013, 37(4): 250–251.
- [36] Serrano M A, Boguna M. Topology of the world trade web[J]. *Physical Review E*, 2003, DOI: 10.1103/PhysRevE.68.015101
- [37] Kali R, Reyes J. The architecture of globalization: A network approach to international economic integration[J]. *Journal of International Business Studies*, 2007, 38: 595–620.
- [38] 牛哲. 世界农产品贸易网络拓扑结构及其演化特征研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020. [Niu Z. Research of the Topological Structure and Evolution Characteristic of World Agricultural Trade Network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.]
- [39] 刘立涛, 沈镭, 刘晓洁, 等. 基于复杂网络理论的中国石油流动格局及供应安全分析[J]. *资源科学*, 2017, 39(8): 1431–1443. [Liu L T, Shen L, Liu X J, et al. Spatial–temporal features of China’s oil trade network and supply security simulation[J]. *Resources Science*, 2017, 39(8): 1431–1443.]
- [40] Tzekina I, Danthi K, Rockmore D N. Evolution of community structure in the world trade web[J]. *European Physical Journal B*, 2008, DOI: 10.1140/epjb/e2008-00181-2.
- [41] 王楠. “一带一路”沿线钢铁贸易网络特征的统计研究: 基于社会网络理论分析[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2020. [Wang N. Statistical Research on the Characteristics of Steel Trade Networks along the Belt and Road: Based on Social Network Theory Analysis [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2020.]
- [42] 朱学红, 彭婷, 湛金字. 战略性关键金属贸易网络特征及其对产业结构升级的影响[J]. *资源科学*, 2020, 42(8): 1489–1503. [Zhu X H, Peng T, Chen J Y. Impact of strategic and critical metals trade network characteristics on the upgrading of industrial structures[J]. *Resources Science*, 2020, 42(8): 1489–1503.]
- [43] 陈艺文. “一带一路”国家粮食贸易网络演化特征及影响因素研究[D]. 开封: 河南大学, 2020. [Chen Y W. Study on the Evolution Characteristics and Influencing Factors of “One Belt and One Road” National Cereal Trade Network[D]. Kaifeng: Henan University, 2020.]
- [44] Fu X M, Chen H X, Xue Z K. Construction of the Belt and Road trade cooperation network from the multi–distances perspective[J]. *Sustainability*, 2018, 10(5): 1439–1439.
- [45] Li Y Y, Li Y L, Pan A, et al. The network structure characteristics and determinants of the Belt & Road industrial robot trade[J]. *Emerging Markets Finance and Trade*, 2021, DOI: 10.1080/1540496X.2021.1897315.
- [46] Covarrubias M, Spaargaren G, Boas I. Network governance and the urban nexus of water, energy, and food: Lessons from Amsterdam [J]. *Energy Sustainability and Society*, 2019, DOI: 10.1186/s13705-019-0196-1.
- [47] Mahjabin T, Mejia A, Blumsack S, et al. Integrating embedded resources and network analysis to understand food–energy–water nexus in the US[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.136153.
- [48] 孙致陆, 李先德. “一带一路”沿线国家与中国农产品贸易现状及农业经贸合作前景[J]. *国际贸易*, 2016, (11): 38–42. [Sun Z L, Li X D. Current situation of agricultural trade and prospects of agricultural economic and trade cooperation between “The Belt and Road” countries and China[J]. *Intertrade*, 2016, (11): 38–42.]
- [49] Coquide C, Ermann L, Lages J, et al. Influence of petroleum and gas trade on EU economies from the reduced Google matrix analysis of UN COMTRADE data[J]. *European Physical Journal B*, 2019, DOI: 10.1140/epjb/e2019-100132-6.
- [50] United Nations (UN). United Nations Commodity Trade Statistics Database[DB/OL]. [2020–06–30]. <https://comtrade.un.org/labs/>.
- [51] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, DOI: 10.5194/hessd-8-763-2011.
- [52] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). FAO Statistical Databases (FAOSTAT)[DB/OL]. [2020–06–30]. <http://www.fao.org/statistics/en/>.
- [53] 中华人民共和国水利部. 中国水利统计年鉴 2019[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020. [Ministry of Water Resources of the People’s Republic of China, China Water Statistical Yearbook

- 2019[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2020.]
- [54] Masud M B, Wada Y, Goss G, et al. Global implications of regional grain production through virtual water trade[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 659: 807–820.
- [55] Dalin C, Konar M, Hanasaki N, et al. Evolution of the global virtual water trade network[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(16): 5989–5994.
- [56] Liu J G, Zehnder A J B, Yang H. Global consumptive water use for crop production: The importance of green water and virtual water [J]. *Water Resources Research*, 2009, DOI: 10.1029/2007WR006051.
- [57] Tuninetti M, Tamea S, Laio F, et al. A fast track approach to deal with the temporal dimension of crop water footprint[J]. *Environmental Research Letters*, 2017, DOI: 10.1088/1748-9326/aa6b09.
- [58] Blondel V D, Guillaume J L, Lambiotte R, et al. Fast unfolding of communities in large networks[J]. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2008, DOI: 10.1088/1742-5468/2008/10/P10008.
- [59] 蔡岳平, 刘军, 樊欣唯. 基于节点中心性度量的内容中心网络缓存机制[J]. *通信学报*, 2017, 38(6): 10–18. [Cai Y P, Liu J, Fan X W. Node centrality metric based caching mechanism in content-centric network[J]. *Journal on Communications*, 2017, 38(6): 10–18.]
- [60] 刘广强. 基于中介中心性的网络传播节点影响力发现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017. [Liu G Q. Discovery of Influence of Network Spread Node Based on Betweenness Centrality[D]. Haerbin: Harbin Engineering University, 2017.]

Virtual water and embodied energy transfer in grain trade across the countries along the “Belt and Road”

WANG Yihan^{1,2}, YANG Jin¹, LIU Qiyun¹, TAN Rui¹, YUAN Hao^{1,3}

(1. School of Economics and Management, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China; 3. Chinese Academy of International Trade and Economic Cooperation, Beijing 100710, China)

Abstract: Countries along the “Belt and Road” are playing an increasingly important role in the international food trade. Examining the transfer of virtual water and energy embodied in irrigation along with intercountry grain trade can provide a theoretical basis and effective reference for sustainable agricultural cooperation in this region. Employing data extracted from UN COMTRADE, FAOSTAT, and Value of Water Research Report, this study comprehensively constructed a global network model of the grain trade and estimated the virtual water and embodied irrigation energy transfers, focusing on the countries along the “Belt and Road”. The results show that larger grain exporters/importers tend to induce higher exports/imports of virtual water and embodied irrigation energy. Nevertheless, food exports might exacerbate the burden of agricultural energy use in some countries, for instance, Russia, which indicates that the reallocation of resources driven by grain trade still needs to be optimized. The stable community structures of virtual water and embodied irrigation energy networks indicate that the extensive resource exchanges embodied in grain trade play a radiating effect within the region. This study suggests that countries along the “Belt and Road” can optimize agricultural resource structure through agricultural trade, strengthen agricultural cooperation, and improve the utilization rate of water and energy resources.

Key words: food-energy-water nexus; grain trade; network model; community structure; countries along the “Belt and Road”