

中国与“一带一路”沿线国家农产品贸易的水资源压力效应

孙才志^{1,2}, 张佳亮³

(1. 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心, 辽宁 大连 116029; 2. 辽宁省“海洋经济高质量发展”高校协同创新中心, 辽宁 大连 116029; 3. 辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁 大连 116029)

摘要:在统计 2001—2020 年中国与“一带一路”沿线国家农产品贸易量的基础上, 结合已有研究成果中的产品水足迹测算其虚拟水量, 通过构建水资源压力指数公式来量化“一带一路”沿线各国的水资源、农业用水压力, 分析了虚拟水贸易时空演化特征及其机理, 并对贸易中产生的农业水资源短缺压力进行了探讨。结果表明: 中国进出口虚拟水量的变化与中国国情及国际事件有关, 进口虚拟水量呈增大趋势, 90% 以上来自于东南亚、南亚、中东欧, 以及蒙古和俄罗斯, 绿水占比 80% 左右; 出口虚拟水量呈稳定态势, 80% 以上出口至东南亚、西亚和中东, 以及蒙古和俄罗斯, 绿水占比 70% 左右; 1/3 以上的“一带一路”沿线国家面临高度、重度水资源压力, 1/2 以上的国家面临高度农业用水压力, 近 2/3 的国家因从中国进口虚拟水资源减轻了农业水资源短缺压力, 近 1/3 的国家因向中国出口虚拟水资源而增大了农业水资源短缺压力。

关键词:农产品贸易; 虚拟水; 水资源压力; “一带一路”沿线国家; 中国

中图分类号:TV211.1⁺1; F407.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)04-0001-08

Effects of water resources stress on agricultural trade between China and countries along Belt and Road //SUN Caizhi^{1,2}, ZHANG Jialiang³ (1. Research Center for Marine Economy and Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China; 2. Liaoning Provincial University Collaborative Innovation Center of High-quality Development of Marine Economy, Dalian 116029, China; 3. College of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: Based on the agricultural trade volume between China and the countries along the Belt and Road from 2001 to 2020, the virtual water volume was measured by combining the water footprint of the products with the existing research results, and the formula of water stress index was constructed to quantify the water resources and agricultural water stress of the countries along the Belt and Road. The spatial and temporal evolution characteristics of virtual water trade and its mechanism were analyzed, and the pressure of agricultural water shortage arising from the trade was discussed. The results show that changes in China's import and export virtual water resources were related to its national conditions and international events. The trend of importing virtual water resources was increasing, with more than 90% coming from Southeast Asia, South Asia, Central and Eastern Europe, Mongolia and Russia, with green water accounting for about 80%. The trend of export virtual water resources was stable, with more than 80% exporting to Southeast Asia, West Asia and the Middle East, Mongolia and Russia, with green water accounting for about 70%. More than 1/3 of the countries along the Belt and Road are facing high and heavy water resources pressure, and more than 1/2 of the countries are facing high agricultural water pressure. Nearly 2/3 of the countries have reduced the pressure of agricultural water scarcity by importing virtual water resources from China. Nearly 1/3 of the countries have increased the pressure of agricultural water shortages by exporting virtual water resources to China.

Key words: agricultural trade; virtual water; water resources stress; countries along Belt and Road; China

水是人类生存及发展中的重要资源。近年来, 随着全球气候变化及社会发展, 人类面临严重的缺水问题, 联合国粮食及农业组织研究表明全球用水

量的增速是 20 世纪人口增速的 2 倍多, 其中农业占全球取水量的 70%, 在一些发展中国家这一比例高达 95%, 人口增长和经济发展给可再生但有限的水

基金项目:国家社会科学基金重点项目(19AJY010)

作者简介:孙才志(1970—), 男, 教授, 博士, 主要从事水资源经济与海洋经济研究。E-mail: suncaizhi@lnnu.edu.cn

水利水电科技进展, 2023, 43(4) Tel: 025-83786335 E-mail: jz@hhu.edu.cn http://jour.hhu.edu.cn

• 1 •

资源带来了前所未有的压力^[1]。由于农业是全球耗水量最大的部门,因此关于农产品贸易而引发的水资源问题逐渐受到了关注,其中虚拟水概念的提出为解决水资源短缺问题提供了新的思路^[2-4]。2013 年中国提出的“一带一路”倡议促进了各国之间的商品贸易,为保障各国的粮食安全及水安全提供了新的平台^[5-6]。因此,基于虚拟水视角研究中国与“一带一路”沿线国家农产品贸易下产生的水资源压力效应对各国水资源可持续发展具有重要意义。

现有研究可归纳为以下几方面:①虚拟水资源估算。估算的方法包括基于生命周期计算的产品生产树计算方法^[7]、产品分类计算法^[8]和投入产出法^[9],这 3 种研究方法均在国际上产生了一定的影响,如 Mekonnen 等^[10-11]在计算产品虚拟水量时提出了“水足迹”的概念,将水资源划分成了绿水、蓝水及灰水,并计算了 1996—2005 年全球 126 种农作物、200 余种衍生品的水足迹,为后续研究提供了极大的便利。②虚拟水流动的时空特征。产品的贸易导致其隐含的虚拟水资源发生转移,这也是虚拟水贸易的理论基础^[12-13],而研究虚拟水流动的时空特征有助于揭示商品贸易下水资源跨界转移的真实状况,如孙才志等^[14]对 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进行了分析,结果表明中国与东南亚国家的虚拟水贸易最为密切。于畅等^[15]使用多区域投入产出法在核算 1990—2015 年“一带一路”沿线国家的原木水足迹的基础上,分析了原木虚拟水空间流动格局演变。③虚拟水贸易影响因素。虚拟水贸易本质是由商品贸易引起的,而商品贸易除了受到资源禀赋差异的影响还受到国情、国际事件等因素的制约。基于此,学者们的研究内容、方法及结果均有不同,如韩冬等^[16]使用社会网络分析方法分析了 2012—2017 年“一带一路”沿线国家粮食贸易格局的影响因素,认为地理距离、文化、贸易协定关系、汇率、水资源、经济体量以及制度是主要因素;李明等^[17]使用双向固定效应模型和泊松伪极大似然估计法分析了 2006—2020 年中国 4 种粮食作物虚拟水进口的影响因素,表明双边经济水平、是否加入世界贸易组织、汇率水平等具有正向影响作用;其他研究方法还有引力模型^[4]、投入产出结构分解分析法^[18]、LMDI 指数分解模型^[19]等。④虚拟水贸易效应。虚拟水资源的跨区域流动会对贸易双方产生不同的影响,如贫水国出口虚拟水会加剧缺水现状,富水国出口虚拟水则会利于经济发展,对当地水资源环境影响较小。已有学者从资源和环境效应^[20]、贸易效益^[21]、水安全^[22-23]、水资源压力^[24]等方面进行分

析,如赵一丹等^[24]在量化中国 2009—2019 年主要粮食贸易虚拟水流动情况的基础上,分析了对中国水资源压力的影响因素。

综上所述,虽然以往的虚拟水贸易研究较为丰富,但在现有关于“一带一路”沿线国家农产品虚拟水贸易的研究中,缺乏基于各国水资源压力基础上农产品虚拟水贸易对各国水资源压力效应的影响研究,特别是此方面的量化研究,对影响贸易的国际事件、政策也缺乏深层次的探索。因此,本文在对中国与“一带一路”沿线国家水资源压力量化研究的基础上,分析虚拟水贸易时空格局演变,开展农产品虚拟水贸易对贸易双方水资源压力的影响研究,旨在通过具体直观的数据反映虚拟水贸易对贸易双方水资源产生的影响,为水资源绿色可持续发展提供理论参考。

1 研究方法

为分析虚拟水的流动特征,需要先测算中国与“一带一路”沿线国家农产品贸易的虚拟水量,并构建水资源压力指数公式,考虑到年度淡水取水量为水源的总抽取量(主要源于地下水、湖泊水等水资源),而绿水通常被认为是植物通过蒸腾作用而散失的水分(主要源于降水),因此在水资源压力相关计算时只需考虑蓝水和灰水^[25]。

1.1 农产品贸易虚拟水量

农产品贸易的虚拟水量计算方式为出口国出口的农产品数量乘以单位农产品的虚拟水量(单位农产品的虚拟水包括绿水、蓝水及灰水),再将各农产品的虚拟水量相加得到农产品贸易虚拟水量^[19]。 m 国出口到 n 国的农产品虚拟水量计算公式为

$$V_{m,n} = \sum_c V_{m,n,c} = \sum_c \sum_r P_{m,n,c} D_{m,c,r} \quad (1)$$

式中: $V_{m,n}$ 为 m 国出口到 n 国的农产品虚拟水总量; $V_{m,n,c}$ 为 m 国出口到 n 国的农产品 c 的虚拟水量; $P_{m,n,c}$ 为 m 国出口到 n 国的产品 c 的数量; $D_{m,c,r}$ 为 m 国产品 c 的 r 组分(绿水、蓝水及灰水)单位虚拟水量。

农产品贸易虚拟水净进口量为出口国从贸易伙伴国进口的虚拟水量和出口国出口到贸易伙伴国的虚拟水量之差,表达式为

$$F_{m,n} = I_{n,m} - E_{m,n} \quad (2)$$

式中: $F_{m,n}$ 为 m 国与 n 国农产品贸易虚拟水净进口量; $I_{n,m}$ 为 m 国从 n 国进口的农产品贸易虚拟水量; $E_{m,n}$ 为 m 国出口到 n 国的农产品贸易虚拟水量。

1.2 水资源压力

联合国粮食及农业组织将水资源压力定义为年度淡水取水总量与年度可再生淡水资源总量之间的

比^[1]。基于此定义,参考以往关于水资源压力相关的研究^[24, 26-28],本文将相关公式进行了改进,其中农业用水压力定义为年度农业取水量与年度淡水取水总量的比,该指标用于说明一国农业用水对本国淡水取水总量的压力;农产品贸易的水压力定义为年度农产品贸易的净出口虚拟水量与年度淡水取水总量的比,该指标用于说明因农产品贸易而产生的水压力(正值表示压力增加,负值表示压力减轻);农业水资源短缺压力定义为农产品贸易的水压力与农业用水压力的比,该指标用于说明一国因农产品贸易产生的水压力对本国农业用水压力产生的影响(正值表示压力增加,负值表示压力减轻)。基于以上定义,构建计算公式如下:

$$S = \frac{L}{Q} \times 100\% \tag{3}$$

$$S_a = \frac{W}{L} \times 100\% \tag{4}$$

$$S_t = \frac{V_e - V_i}{L} \times 100\% \tag{5}$$

$$H = \frac{S_t}{S_a} \times 100\% \tag{6}$$

式中: S 为各国的水资源压力; L 为各国的年度淡水取水总量; Q 为各国的年度可再生水资源总量; S_a 为各国的农业用水压力; W 为各国年度农业取水量; S_t 为农产品贸易产生的水压力; V_e 为各国出口农产品引起的虚拟水量(包括蓝水、灰水); V_i 为各国进口农产品引起的虚拟水量(包括蓝水、灰水); H 为农业水资源短缺压力。

基于《中国生态足迹报告》^[29]对各国水资源压力、农业用水压力等级划分如下:大于或等于 100% 为重度压力;[40%, 100%) 为高度压力;[20%, 40%) 为中度压力;[5%, 20%) 为轻度压力;[0%, 5%) 为无压力。

2 研究对象及数据处理

2.1 研究对象

“一带一路”倡议是开放、包容的新平台,对于国家、地区没有国别限制,因此为方便数据核算,根据联合国统计司 1999 年发布的“统计用标准国家或地区代码”的在线版本即“M49 标准”^[30],选取了“一带一路”沿线 65 个国家作为中国的贸易伙伴,并按照地域特征将其划分 6 个地区,见表 1。

2.2 数据来源及处理

a. 农产品贸易数据。本文中的农产品贸易数据来源于 FAOSTAT 数据库^[1],选取了 2001—2020 年间 79 种农产品为核算目标,并划分成 15 类:谷物类、植

表 1 “一带一路”沿线国家地理区划

地区	国家
蒙俄	蒙古、俄罗斯
东南亚	文莱、柬埔寨、印度尼西亚、老挝、马来西亚、缅甸、菲律宾、新加坡、泰国、越南
南亚	孟加拉国、不丹、印度、马尔代夫、尼泊尔、巴基斯坦、斯里兰卡
中亚	哈萨克斯坦、土库曼斯坦、塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦
西亚和中东	阿塞拜疆、格鲁吉亚、亚美尼亚、伊朗、阿富汗、伊拉克、土耳其、叙利亚、约旦、以色列、巴勒斯坦、沙特阿拉伯、巴林、卡塔尔、也门、阿曼、阿联酋、科威特、黎巴嫩、塞浦路斯、埃及
中东欧	白俄罗斯、保加利亚、捷克、匈牙利、摩尔多瓦、波兰、罗马尼亚、斯洛伐克、乌克兰、爱沙尼亚、拉脱维亚、立陶宛、阿尔巴尼亚、波黑、克罗地亚、马其顿、黑山、希腊、塞尔维亚、斯洛文尼亚

物油类、蔬菜类、糖类、坚果类、水果类、烟草类、酒类、调料类、油籽类、咖啡饮品类、肉类、乳蛋类、棉麻类、活动物类。

b. 单位农产品虚拟水量。单位农产品虚拟水量数据来源于联合国教育科学及文化组织发布的第 50 期水研究价值报告^[31],对于其中极少数国家缺失的单位农产品虚拟水量数据,根据其地域特征、经济水平、农业水平综合分析后,采用相邻相似的国家单位农产品虚拟水量代替,如阿富汗、新加坡的单位农产品虚拟水量分别由巴基斯坦和文莱代替。

c. 各国水资源相关指标。各国的可再生水资源总量、年度淡水取水总量、农业取水量均来源于世界银行^[32],由于该数据每 5 年更新一次,因此分别将已更新的 2002 年、2007 年、2012 年、2017 年的数据作为 2001—2005 年、2006—2010 年、2011—2015 年、2016—2020 年的平均值,由于数据差异不大,故对研究结果不构成影响。极少数国家(黑山、科威特、波黑及巴勒斯坦)数据缺失,处理方式如下:黑山的可再生水资源总量参考阿尔巴尼亚、克罗地亚、塞尔维亚的均值;巴勒斯坦的数据参考以色列;波黑的农业用水压力参考塞尔维亚;科威特由于水资源极度匮乏,境内几乎没有淡水资源,因此在水资源压力相关测算中没有将其纳入,而是将其直接归类为重度水资源压力国家。

3 结果与分析

3.1 中国与“一带一路”沿线国家水资源及农业用水压力分析

3.1.1 水资源压力

对 2001 年和 2020 年各国水资源压力及农业用水压力的分析表明,各国水资源压力变化不大,处于重度压力的国家有 17 个,主要位于中东和西亚及中亚等地;高度压力的国家由 7 个增加至 8 个,主要位

于中东和西亚及中东欧等地;中度压力的国家由 12 个减少至 10 个,主要位于中东和西亚及中东欧等地;轻度及无压力的国家由 30 个增加至 31 个,主要位于蒙俄、东南亚、中东欧等地;比中国压力高的国家主要分布在中东和西亚、中亚等地,由 36 个减少至 34 个,如图 1 所示。

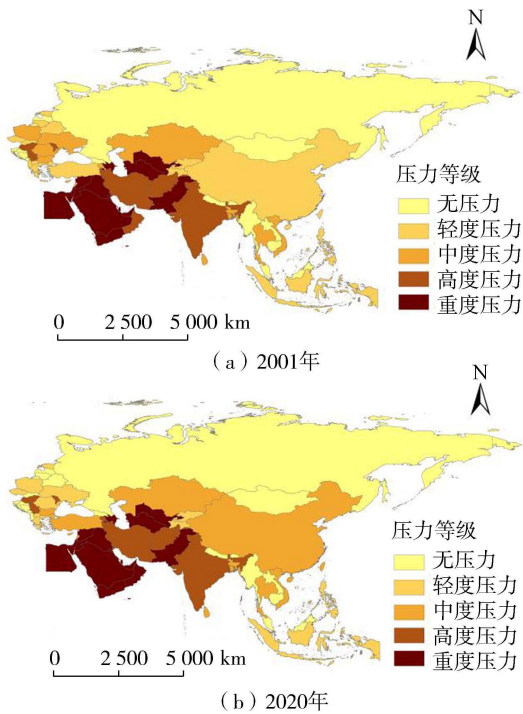


图 1 中国与“一带一路”沿线国家水资源压力

3.1.2 农业用水压力

对 2001 年和 2020 年各国农业用水压力的分析表明,处于高度压力的国家由 45 个减少至 41 个,这些国家主要分布在东南亚、南亚、中亚、西亚和中东等地;处于中度压力的国家由 3 个增加至 10 个,增加的国家主要分布在蒙俄、中东欧等地;轻度及无压力的国家由 18 个减少至 15 个,主要分布在中东欧等地;比中国压力高的国家有 30 个,主要分布在西亚和中东、中亚及部分东南亚国家,如图 2 所示。综上所述,水资源压力与农业用水压力不匹配,尤其是高度、重度水资源压力的国家拥有高度的农业用水压力,出现该现状主要与各国的自然资源状况及经济结构有关。重度、高度水资源压力的国家主要位于中东和西亚及中亚等地,这些地区受副热带高压及东北信风的影响,气候以热带沙漠气候为主,这就导致该地区降水量少、蒸发量大且下渗作用强烈,因而该地区可再生水资源量较小;重度、高度农业用水压力的国家主要位于东南亚、南亚、中亚、西亚和中东等地,东南亚、南亚受热带雨林气候、热带季风气候影响而降水较多,可再生水资源量较大,农业又是当地较为发达的产业之一,因此面临高度农业用

水压力对当地水资源可持续发展影响不大,但中亚、西亚和中东等地本就水资源较为匮乏,为保证各自的粮食安全,农业在各国也占据着较高的地位,因此农业取水一旦偏多就会面临着高度的农业用水压力,这将不利于水资源可持续发展,更容易导致水资源紧张,加剧水资源短缺。

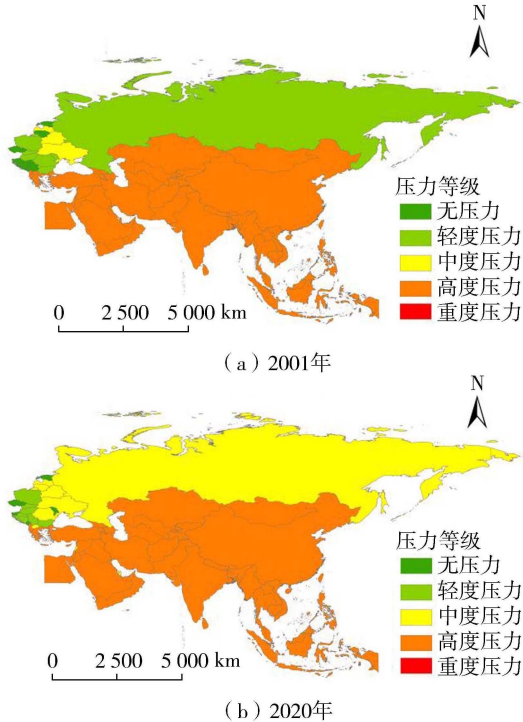


图 2 中国与“一带一路”沿线国家农业用水压力

3.2 中国与“一带一路”沿线国家农产品虚拟水贸易的时空演化机理分析

2001—2020 年期间,中国出口虚拟水资源总量为 1 552.04 亿 m^3 ,平均每年出口 77.6 亿 m^3 ,总体来看出口量每年变化不大,较为稳定;中国进口虚拟水资源总量为 10 387.86 亿 m^3 ,平均每年进口 519.39 亿 m^3 ,总体来看进口量呈现逐年增大的趋势,由 2001 年的 121.17 亿 m^3 增大至 2020 年的 868.80 亿 m^3 ;中国净进口虚拟水资源总量为 8 835.82 亿 m^3 ,平均每年净进口 441.79 亿 m^3 ,净进口量总体呈现逐年增大趋势,由 2001 年的 52.91 亿 m^3 增大至 2020 年的 796.38 亿 m^3 ,如表 2 所示。

3.2.1 中国出口农产品虚拟水量的演化机理

由表 2 可知,中国历年出口的虚拟水资源量呈现先增大后减小进而逐步稳定的发展趋势。具体来看,2001—2003 年中国保持稳定增长趋势,与中国加入世界贸易组织,促进与各国之间的商品贸易有一定关联,在此期间,中国货物出口总额由 2001 年的 2 661 亿美元增长到 2003 年的 4 382.3 亿美元^[33],因此会导致出口农产品虚拟水量的增加。2004—2020 年中国出口农产品虚拟水量保持波动变化,但

表 2 2001—2020 年中国与“一带一路”沿线国家农产品
虚拟水贸易总量 单位:亿 m³

年份	总进口	总出口	净进口	年份	总进口	总出口	净进口
2001 年	121.17	68.26	52.91	2011 年	568.22	71.08	497.14
2002 年	134.65	111.33	23.32	2012 年	773.58	66.93	706.65
2003 年	201.53	154.68	46.85	2013 年	722.34	63.99	658.35
2004 年	264.64	55.90	208.74	2014 年	664.52	59.04	605.48
2005 年	299.75	73.43	226.32	2015 年	678.37	61.86	616.51
2006 年	436.79	70.82	365.97	2016 年	582.89	68.96	513.93
2007 年	429.02	86.17	342.85	2017 年	624.31	75.55	548.76
2008 年	440.82	69.21	371.61	2018 年	677.24	89.24	588.00
2009 年	438.79	72.00	366.79	2019 年	902.74	94.51	808.23
2010 年	557.69	66.64	491.05	2020 年	868.80	72.42	796.38

均在 70 亿 m³ 上下浮动,表明此期间中国出口的农产品呈现稳定态势,一些国际事件等对贸易影响较小,如 2008 年全球经济危机对中国出口农产品虚拟水影响不大,与 2007 年相比,2008 年少出口了 16.96 亿 m³。之后全球经济复苏以及“一带一路”倡议等又促进了商品贸易,中国出口农产品虚拟水量有所增加,但增加量不大。这与中国国情有一定关联,中国是人口大国,2004—2020 年人口共增长 1.12 亿,人口数量的增加以及中国的产业转型会导致农产品需求量的增加,因此每年出口的农产品虚拟水量变化不大。

3.2.2 中国进口农产品虚拟水量的演化机理

由表 2 可知,2001—2020 年中国进口“一带一路”沿线国家农产品虚拟水量总体上呈现增大趋势。具体来看,2001—2006 年进口量呈增大趋势,中国人口数量从 2001 年的 12.76 亿增加至 2006 年的 13.14 亿,居民消费水平由 2001 年的 3968 元增加至 2006 年的 6319 元^[33],人口数量的增加以及消费水平的提高均会导致农产品虚拟水进口量的增加。2007—2009 年中国进口量基本上保持不变,与 2008 年的经济危机有一定关联,经济危机爆发使得全球经济发展受阻,全球商品贸易占 GDP 的比重由 2008 年的 51.1% 下降到 2009 年的 41.7%^[32],中国的进口贸易也受到影响,与 2008 年相比,2009 年进口货物总额减少了 1266.4 亿美元^[33],这也会波及中国进口“一带一路”沿线国家农产品虚拟水量。2009 年后,各国均调整贸易策略来应对经济危机带给本国的损失,使得商品贸易暂时反弹^[32],全球商品贸易占 GDP 的比重由 2009 年的 41.7% 增长至 2011 年的 50%^[32]。与此同时,中国与“一带一路”沿线国家的农产品贸易合作也逐渐恢复,农产品虚拟水进口量由 2009 年的 438.79 亿 m³ 增加至 2012 年的 773.58 亿 m³,增长了 334.79 亿 m³。

“一带一路”倡议带动了农产品贸易的新发展,但 2012—2016 年中国农产品虚拟水进口量却呈下降趋势,由 2012 年的 773.58 亿 m³ 减小到 2016 年

的 582.89 亿 m³,这与各国制定的贸易保护政策有关。研究表明,2009—2018 年世界各国共实施了 15000 多项贸易干预措施^[34],其中贸易保护措施超过 11600 项,远大于 4000 多项的贸易开放措施。虽然在 2009 年各国财政刺激政策下,全球商品贸易出现反弹,但仍然保持低迷,2012—2016 年全球贸易增速与全球经济增速基本持平,改变了第二次世界大战之后全球贸易增长快于经济增长的态势,在此情况下,中国货物进口总额也由 2012 年的 18184.1 亿美元减少到 2016 年的 15879.3 亿美元^[33]。随着 2016—2020 年人口数量的增加以及居民消费水平的增长,中国农产品虚拟水进口量也由 2016 年的 582.89 亿 m³ 增长至 2019 年的 902.74 亿 m³,但由于新冠疫情的影响,相比于 2019 年,2020 年农产品虚拟水进口量减少了 33.94 亿 m³,为 868.80 亿 m³。虽然 2013—2020 年中国农产品虚拟水进口呈先下降后增长的趋势,但相对于 2012 年之前,仍为增长的态势,2013—2020 年累计净进口 5135.65 亿 m³,平均每年净进口 641.96 亿 m³,远大于 2001—2012 年净进口量(累计净进口 3700.18 亿 m³,平均每年净进口 308.35 亿 m³)。

3.3 中国农产品虚拟水贸易在“一带一路”沿线国家的分布

3.3.1 中国进口农产品虚拟水的国家分布

通过 2001 年、2020 年中国进口农产品虚拟水数据对比发现,中国进口“一带一路”沿线国家农产品虚拟水总量在增加,由 2001 年的 121.17 亿 m³ 增长至 2020 年的 868.80 亿 m³,虚拟水出口国家也由 2001 年的 31 个增加到 2020 年的 55 个,增加的国家大部分位于中东欧地区,水资源压力、农业用水压力大部分低于中国,如表 3 所示。具体来看,东南亚地区由 2001 年的 116.71 亿 m³ 增长至 2020 年的 420.41 亿 m³,在出口的虚拟水资源中,绿水为主要的水资源类型,占比 91.86%,在此地区增长较快的国家为印度尼西亚、马来西亚、泰国和越南,其余国家变化不大;中东欧地区由 2001 年的 2.28 亿 m³ 增长至 2020 年的 212.05 亿 m³,出口国家数量由 2001 年的 4 个增加至 2020 年的 20 个,在出口的虚拟水资源中,绿水为主要的水资源类型,占比 91.51%,在此地区增长较快的国家为乌克兰、白俄罗斯、保加利亚,其余国家变化不大;蒙古和俄罗斯由 2001 年的 1.22 亿 m³ 增长至 2020 年的 110.86 亿 m³,增长了 109.64 亿 m³,在出口的虚拟水资源中,绿水为主要的水资源类型,占比 95.95%,其中增长量最大的是俄罗斯;南亚地区由 2001 年的 0.65 亿 m³ 增长至 2020 年的 77.19 亿 m³,增长了 76.53 亿 m³,在出口的虚拟水资源中,绿水为主要的水资源类型,占比

表3 2001年、2020年中国进口“一带一路”
沿线国家农产品虚拟水量 单位:亿 m³

地区	2001 年				2020 年			
	绿水	蓝水	灰水	总量	绿水	蓝水	灰水	总量
蒙俄	1.15	0.02	0.05	1.22	106.34	1.59	2.93	110.86
东南亚	108.56	3.60	4.55	116.71	387.54	9.13	23.74	420.41
南亚	0.57	0.04	0.04	0.65	58.16	12.14	6.89	77.19
中亚	0.01	0.01	0.01	0.03	22.12	1.71	0.59	24.42
西亚和 中东	0.08	0.17	0.03	0.28	14.68	6.98	2.21	23.87
中东欧	2.22	0.01	0.05	2.28	194.19	6.79	11.07	212.05

75.25%,其中增长较快的国家为印度和斯里兰卡,其余国家变化不大;中亚、西亚和中东地区虽然出口的虚拟水资源增长不够显著,但是各地区的出口国家数量却有一定的增加,其中中亚的塔吉克斯坦和乌兹别克斯坦在2002年也开始出口虚拟水资源,而西亚和中东地区则由2001年的8个出口国家增长至2020年的15个。综上所述,中国进口的虚拟水资源主要来源于东南亚、南亚及中东欧等地,这些地区水资源相对富集,农业较为发达,水资源压力大部分小于中国,而农业用水压力虽然部分国家高于中国,但由于农业发达且水资源可再生量高于中国,因此从这些地区进口水资源是有利于水资源可持续发展的。

3.3.2 中国出口农产品虚拟水的国家分布

通过对比2001年、2020年中国出口农产品虚拟水数据可以发现,中国出口农产品虚拟水量变化不大(表4),出口国家数量增加也不明显,主要出口的地区集中在东南亚、西亚和中东,除东南亚部分国家水资源压力低于中国外,其他大部分国家水资源压力、农业用水压力均高于中国,从中国进口虚拟水资源有利于各国的水资源可持续发展。具体来看,东南亚地区2001年从中国进口虚拟水量为39.74亿 m³,2020年进口36.28亿 m³,在进口的虚拟水资源中,绿水为主要的水资源类型,排名靠前的国家为马来西亚、印度尼西亚、越南及菲律宾;西亚和中东地区2020年虚拟水进口量相对于2001年增加了8.66亿 m³,为15.99亿 m³,进口的虚拟水资源以绿水为主,排名靠前的国家为土耳其和埃及,其他国家除叙利亚和也门外也都实现了进口虚拟水量的

表4 2001年、2020年中国出口“一带一路”
沿线国家农产品虚拟水量 单位:亿 m³

地区	2001 年				2020 年			
	绿水	蓝水	灰水	总量	绿水	蓝水	灰水	总量
蒙俄	5.51	0.69	1.52	7.72	5.31	0.21	1.09	6.61
东南亚	27.47	2.86	9.41	39.74	26.07	1.25	8.96	36.28
南亚	4.93	0.34	1.58	6.85	4.39	0.21	1.51	6.11
中亚	3.15	0.30	0.60	4.05	3.64	0.30	0.68	4.62
西亚和 中东	5.09	0.59	1.65	7.33	12.21	1.32	2.46	15.99
中东欧	2.01	0.13	0.43	2.57	2.14	0.12	0.55	2.81

增加;蒙俄、南亚、中亚及中东欧地区历年变化不大,2020年累计进口20.15亿 m³,与2001年相比减少了1.04亿 m³,下降了3.22%。综上所述,“一带一路”沿线国家可以充分利用“一路一带”倡议的便利,为缓解本国的水资源短缺问题以及发展经济与中国实现合作共赢,贫水国家通过合作缓解了水资源短缺问题,而富水国家在出口水资源的同时促进了经济发展。

3.4 中国与“一带一路”沿线国家农业水资源短缺压力

对2001年、2020年“一带一路”沿线各国因与中国农产品贸易而增加或减轻的农业水资源短缺压力进行分析,结果表明,2001年中国由于净出口虚拟水资源而增加了农业水资源短缺压力为0.3%;共有57个国家从中国净进口虚拟水资源减轻了农业水资源短缺压力,泰国和匈牙利由于向中国净出口虚拟水资源而增加了农业水资源短缺压力,压力均小于5%;无贸易国家6个,如图3所示(图中正值表示农业水资源短缺压力增加,负值表示农业水资源短缺压力减轻)。结合图1、图2来看,2001年中国属于轻度水资源压力、高度农业用水压力国家。在农业水资源短缺压力减轻的57个国家中,水资源压力、农业用水压力均高于中国的有18个国家,主要分布在西亚和中东、中亚、南亚等地,水资源压力高于中国但农业用水压力低于中国的国家有14个,主要分布在西亚和中东、中东欧等地,以上两类国家从中国适度净进口虚拟水资源符合水资源可持续发展的规律;水资源压力、农业用水压力均低于中国的

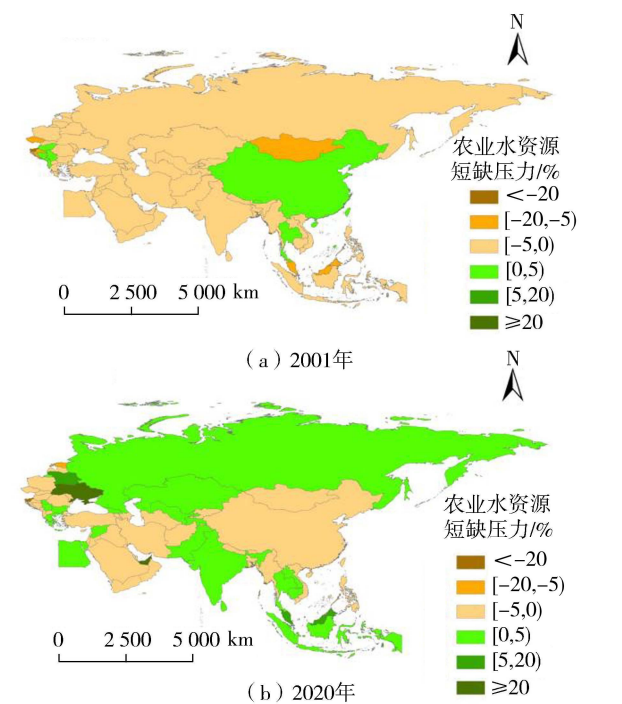


图3 各国农业水资源短缺压力

有 14 个国家,主要分布在蒙俄、中东欧等地,水资源压力低于中国但农业用水压力高于中国的国家有 11 个,主要分布在东南亚、中亚及部分中东欧地区,以上两类国家由于水资源压力较小,因此不适宜从中国净进口虚拟水资源,应从提升农业技术水平、优化农作物生产结构等方面来减轻水资源压力。虚拟水资源净出口至中国的国家只有泰国和匈牙利,此两国水资源压力均大于中国(其中泰国农业用水压力也大于中国),虽然净出口量不大,对其产生的农业水资源短缺压力指数也较小,但也不利于水资源可持续发展。

2020 年中国由于净进口虚拟水资源而减轻了农业水资源短缺压力,压力指数为-1.8%;共有 43 个国家从中国净进口虚拟水资源来减轻农业水资源短缺压力,共有 22 个国家因向中国净出口虚拟水资源而增加了农业水资源短缺压力。结合图 1、图 2 来看,2020 年中国属于中度水资源压力、高度农业用水压力国家。农业水资源短缺压力减轻的 43 个国家中,水资源压力、农业用水压力均高于中国的有 12 个国家,主要分布在西亚和中东地区,水资源压力高于中国但农业用水压力低于中国的国家有 11 个,同样主要分布在西亚和中东等地;水资源压力、农业用水压力均低于中国的有 15 个国家,主要分布在中东欧、西亚和中东等地,水资源压力低于中国但农业用水压力高于中国的国家有 5 个,主要分布在南亚和东南亚等地区。农业水资源短缺压力增加的 22 个国家中水资源压力、农业用水压力均高于中国的有 8 个国家,主要分布在西亚和中东地区,水资源压力高于中国但农业用水压力低于中国的有 3 个国家,以上两类国家向中国净出口虚拟水资源是不利于水资源可持续发展的,实际上,这 11 个国家净出口的虚拟水量不大,但在未来的贸易中也要注意自身的水资源状况;水资源压力、农业用水压力均低于中国的有 6 个国家,主要分布在中东欧等地,水资源压力低于中国但农业用水压力高于中国的有 5 个国家,主要分布在东南亚等地,以上两类国家向中国净出口虚拟水资源有利于水资源可持续发展,但农业用水压力高于中国的国家在未来贸易中也要考虑自身的农业用水问题,以期使贸易双方达成双赢的局面。

4 结论与建议

a. 2001—2020 年期间,“一带一路”沿线国家 1/3 以上面临高度、重度水资源压力,主要位于西亚和中东、中亚及中东欧等地,1/2 以上的国家面临高度农业用水压力,主要位于东南亚、南亚、中亚、西亚和中东等地。部分国家水资源压力与农业用水压力不匹配主要与其自身自然资源状况及经济发展结构

有关。
b. 2001—2020 年期间,中国进出口虚拟水量的变化与中国国情、国际事件以及各国所采取的贸易保护措施有关;中国进口虚拟水资源呈逐渐增大趋势,主要来自东南亚、南亚、中东欧,以及蒙古和俄罗斯,占比 90% 以上,进口水类型以绿水为主,历年占比在 80% 左右;中国出口虚拟水资源呈稳定发展趋势,主要出口至东南亚、西亚和中东等地,占比 80% 以上,出口水类型以绿水为主,历年占比在 70% 左右。

c. 2001—2020 年期间,中国因农产品贸易导致的农业水资源短缺压力时间演变规律与进、出口农产品虚拟水量的演变机理相同,压力演变趋势由增加转变为减轻,近 2/3 的国家从中国进口虚拟水资源而减轻了压力,主要分布在西亚和中东、中亚、中东欧等地;近 1/3 的国家因中国进口虚拟水资源而增加了压力,主要分布在东南亚、中东欧、西亚和中东等地。

d. 建议在未来的相关研究中,应考虑水资源压力、农业用水压力因素,开展更为精确的量化研究,并结合各国自身现状制定能够互惠互利的政策措施。

参考文献:

[1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT[DB/OL] . [2022-05-30] . <http://www.fao.org/faostat/zh/#data/TM>.
[2] 程国栋. 虚拟水:中国水资源安全战略的新思路[J]. 中国科学院院刊, 2003, 18 (4): 260-265. (CHENG Guodong. Virtual water: a strategic instrument to achieve water security [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2003, 18 (4): 260-265. (in Chinese))
[3] 赵勇, 黄可静, 高学睿, 等. 黄河流域粮食生产水足迹及虚拟水流动影响评价[J]. 水资源保护, 2022, 38 (4): 39-47. (ZHAO Yong, HUANG Kejing, GAO Xuerui, et al. Evaluation of grain production water footprint and influence of grain virtual water flow in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (4): 39-47. (in Chinese))
[4] 高玉琴, 李媛媛, 高见, 等. 虚拟水影响下区域水资源承载力评价[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42 (5): 22-27. (GAO Yuqin, LI Yuanyuan, GAO Jian, et al. Evaluation of regional water resources carrying capacity under influence of virtual water[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42 (5): 22-27. (in Chinese))
[5] 孙才志, 高春阳. 中国与“一带一路”沿线国家能源贸易隐含水足迹分形特征分析[J]. 水资源保护, 2022, 38 (1): 52-61. (SUN Caizhi, GAO Chunyang. Analysis on

- fractal characteristics of implied water footprint of energy trade between China and countries along “the Belt and Road”[J]. *Water Resources Protection*,2022,38(1):52-61. (in Chinese))
- [6] 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[J]. *水利经济*,2020,38(1):1-7. (SUN Caizhi,WANG Zhonghui. Driving factors for virtual water trade of agricultural products between China and countries along “Belt and Road”[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2020, 38(1):1-7. (in Chinese))
- [7] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade[J]. *Water Science & Technology*, 2002, 49(11):203-209.
- [8] ZIMMER D, RENAULT D. Virtual water in food production and global trade: review of methodological issues and preliminary results [C]//HOEKSTRA A Y. *Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade*. Delft:International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering,2003:93-107.
- [9] LEONTIEF W. Environmental repercussions and economic structure: an input-output approach [J]. *Review of Economics Statistics*,1970,52(3):262-271.
- [10] MEKONNEN M M,HOEKSTRA A Y. The green,blue and grey water footprint of crops and derived crop products [R]. Delft:UNESCO-IHE, 2010.
- [11] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. The green, blue and grey water footprint of farm animals and animal products[R]. Delft:UNESCO-IHE,2010.
- [12] HOEKSTRA A Y. Human appropriation of natural capital: a comparison of ecological footprint and water footprint analysis[J]. *Ecological Economics*,2009,68(7):1963-1974.
- [13] 周姣,史安娜. 虚拟水和虚拟水贸易研究综述与展望[J]. *河海大学学报(哲学社会科学版)*, 2010, 12(4):64-67. (ZHOU Jiao,SHI Anna. Review and prospect of study on virtual water and virtual water trade[J]. *Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences)*,2010, 12(4):64-67. (in Chinese))
- [14] 孙才志,王中慧. 中国与“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. (SUN Caizhi, WANG Zhonghui. Characteristics of virtual water volume flow of agricultural products trade between China and countries along “Belt and Road”[J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(1):14-19. (in Chinese))
- [15] 于畅,岳丹萌,宫梦蝶,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. (YU Chang, YUE Danmeng, GONG Mengdie,et al. Accounting and spatial flow pattern of the timber water footprint in countries along the “Belt and Road”[J]. *Forestry Economics*,2020,42(10):16-27. (in Chinese))
- [16] 韩冬,李光泗. 中国与“一带一路”沿线国家粮食贸易格局演变与影响机制:基于社会网络学视角[J]. *农业经济问题*,2020(8):24-40. (HAN Dong,LI Guangsi. Research on the evolution and the influence mechanism of grain trade pattern between China and countries along the “Belt and Road”:from the perspective of social network[J]. *Issues in Agricultural Economy*,2020(8):24-40. (in Chinese))
- [17] 李明,潘子纯,李崇光. 中国粮食作物虚拟水进口贸易格局与影响因素[J]. *农业现代化研究*,2022,43(4):715-725. (LI Ming, PAN Zichun, LI Chongguang. The import pattern of virtual water from grain crops and the influencing factors [J]. *Research of Agricultural Modernization*,2022,43(4):715-725. (in Chinese))
- [18] 黄敏,黄炜. 中国虚拟水贸易的测算及影响因素研究[J]. *中国人口·资源与环境*,2016,26(4):100-106. (HUANG Min, HUANG Wei. Measurement of virtual water trade and its impact factors in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(4):100-106. (in Chinese))
- [19] QIAN Yiyi,TIAN Xu,GENG Yong,et al. Driving factors of agricultural virtual water trade between China and the Belt and Road countries [J]. *Environmental Science & Technology*,2019,53(10):52877-5886.
- [20] 奎国秀,祁春节,方国柱. 中国主要粮食产品进口贸易的资源效应和环境效应研究[J]. *世界农业*,2021(5):16-25. (KUI Guoxiu,QI Chunjie,FANG Guozhu. Study on the resource effect and environmental effect of China’s import trade of major grain[J]. *World Agriculture*,2021(5):16-25. (in Chinese))
- [21] 井璐,黄德春. 中国主要农产品的虚拟水进口效益分析[J]. *江西农业学报*,2016,28(9):130-134. (JING Lu, HUANG Dechun. Study on importing benefits of virtual water in China’s main agricultural products [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2016, 28(9):130-134. (in Chinese))
- [22] 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 water security and food security[J]. *Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences)*,2014,16(1):56-60. (in Chinese))
- [23] 陈文龙,马志鹏,袁菲,等. 粤港澳大湾区水安全协同调控理论框架研究[J]. *水资源保护*,2023,39(1):22-31. (CHEN Wenlong, MA Zhipeng, YUAN Fei, et al. Theoretical framework of water security collaborative regulation and control in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Water Resources Protection*,2023,39(1):22-31. (in Chinese))

(下转第24页)

- study of Lanzhou City [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(3): 229-234. (in Chinese))
 - [30] 李晓文,方创琳,黄金川,等. 西北干旱区城市土地利用变化及其区域生态环境效应:以甘肃河西地区为例[J]. 第四纪研究, 2003, 23(3): 280-290. (LI Xiaowen, FANG Chuanglin, HUANG Jinchuan, et al. The urban land use transformations and associated effects on eco-environment in Northwest China arid region: a case study in Hexi Region, Gansu Province [J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(3): 280-290. (in Chinese))
 - [31] 路昌,张傲. 东北地区土地利用转型及其生态环境效应[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(4): 123-133. (LU Chang, ZHANG Ao. Land use transformation and its eco-environment effects in Northeast China [J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(4): 123-133. (in Chinese))
 - [32] 李云强,齐伟,王丹,等. GIS支持下山区县域农村居民点分布特征研究:以栖霞市为例[J]. 地理与地理信息科学, 2011, 27(3): 73-77. (LI Yunqiang, QI Wei, WANG Dan, et al. Research on spatial distribution characteristics of rural settlements in mountainous areas at county level based on GIS: a case study in Qixia City [J]. Geography and Geo-Information Science, 2011, 27(3): 73-77. (in Chinese))
 - [33] 王莉雯,卫亚星,牛铮. 基于遥感的青海省植被覆盖时空变化定量分析[J]. 环境科学, 2008, 29(6): 1754-1760. (WANG Liwen, WEI Yaxing, NIU Zheng. Analysis of vegetation spatial and temporal variations in Qinghai Province based on remote sensing [J]. Environmental Science, 2008, 29(6): 1754-1760. (in Chinese))
 - [34] 韩先明,左德鹏,李佩君,等. 雅鲁藏布江流域植被覆盖变化及其对气候变化的响应[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(1): 16-23. (HAN Xianming, ZUO Depeng, LI Peijun, et al. Spatiotemporal variability of vegetation cover and its response to climate change in Yarlung Zangbo River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(1): 16-23. (in Chinese))
 - [35] 肖祖香,朱双,罗显刚,等. 三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(6): 515-520. (XIAO Zuxiang, ZHU Shuang, LUO Xiangang, et al. Multi-scale hydrological drought characteristics and vegetation responses in the Three-River-Source Region [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(6): 515-520. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-06-16 编辑:熊水斌)
- +++++
- (上接第8页)
- [24] 赵一丹,陈红. 虚拟水视角下我国主粮贸易对水资源压力的影响[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(4): 69-73. (ZHAO Yidan, CHEN Hong. Impact of China's staple food trade on water resources pressure from the perspective of virtual water [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2022, 50(4): 69-73. (in Chinese))
 - [25] MARGAT J, FRENKEN K, FAURÈS J M. Key water resources statistics in Aquastat, FAO's global information system on water and agriculture[R]. Vienna: [s. n], 2005.
 - [26] 封琼,毕忠飞,刘俊. 淮河流域农业水资源压力时空演变及预测分析[J]. 水电能源科学, 2022, 40(11): 27-30. (FENG Qiong, BI Zhongfei, LIU Jun. Time and temporal evolution and prediction analysis of agricultural water resources pressure in Huaihe river basin [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(11): 27-30. (in Chinese))
 - [27] 鲁仕宝,尚毅梓,王浩. 基于修正水资源压力指数的华东地区水-能-粮协同安全评估[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(2): 68-77. (LU Shibao, SHANG Yizi, WANG Hao. Assessment on water-energy-grain collaborative security in east China based on modified water resource pressure index [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(2): 68-77. (in Chinese))
 - [28] 范星,陈彬. 三江平原粮食作物生产水足迹时空特征及影响因素分析[J]. 生态学报, 2022, 42(15): 1-13. (FAN Xing, CHEN Bin. Spatio-temporal patterns and influencing factors of the water footprint of grain crop production in the Sanjiang Plain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(15): 1-13. (in Chinese))
 - [29] 谢高地,曹淑艳,罗志海,等. 中国生态足迹报告[R]. 北京:世界自然基金会, 2010.
 - [30] UNSD. Standard country or area codes for statistical use [S/OL]. [2022-06-01]. <https://unstats.un.org/unsd/methodology/m49/>. htm.
 - [31] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. National water footprint accounts: the green, blue and grey water footprint of production and consumption [R]. Delft, the Netherlands; UNESCO-IHE, 2011.
 - [32] MALPASSD. Word bank open data [DB/OL]. [2022-05-30]. <https://data.worldbank.org.cn>.
 - [33] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2022.
 - [34] 郑宇. 开放还是保护:国家如何应对经济危机? [J]. 世界经济与政治, 2018(12): 134-155, 160. (ZHENG Yu. Liberalization or protection; how do states respond to the global financial crisis? [J]. World Economics and Politics, 2018(12): 134-155, 160. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-10-15 编辑:骆超)