

中国与“一带一路”沿线典型国家贸易虚拟水分析

孟凡鑫¹, 夏昕鸣², 胡元超¹, 杨志峰^{1,3}

(1. 东莞理工学院生态环境工程技术研发中心, 东莞 523808; 2. 北京大学城市和环境科学学院, 北京 100871;
3. 广东工业大学环境生态工程研究院, 广州 510006)

摘要: 本文基于多区域投入产出分析方法, 建立了全球多尺度嵌套模型及相应环境卫星矩阵数据库, 测算了中国对“一带一路”沿线典型国家商品和服务贸易的虚拟水量。总体来说, 中国在与“一带一路”沿线典型国家进行贸易时, 国内生产耗水量小于国内消费虚拟水, 属于虚拟水的“国内消费、国外承担”模式, 是虚拟水净进口国。俄罗斯和韩国是中国虚拟水的主要出口国家, 印度和印度尼西亚是中国虚拟水的主要进口国。研究表明, 中国沿海、内陆、东北、西北及西南地区的国内外出口贸易虚拟水依次减少, 在贸易虚拟水足迹行业结构中, 农林牧渔业是最大的虚拟水净出口部门, 食品及烟草行业、建筑业、其他服务业是位于前三的虚拟水进口部门。

关键词: 投入产出分析; 虚拟水足迹; 进出口贸易; “一带一路”

中图分类号: X22 **文献标识码:** A

Virtual Water in Trade between China and Typical Countries along the Belt and Road

Meng Fanxin¹, Xia Xinming², Hu Yuanchao¹, Yang Zhifeng^{1,3}

(1. Research Center for Eco-Environmental Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, Guangdong, China;
2. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Institute of Environmental & Ecological Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: This study constructed a global multi-scale nested model and a corresponding environmental satellite account, based on the multi-regional input-output analysis method; and estimated the virtual water volume for China's trade in commodity and service with typical countries along the Belt and Road. Results show that in China's trade with these countries, water consumed in China's domestic production is less than virtual water implied in commodities and services consumed by China's domestic consumers, which indicates that China's domestic consumption of virtual water is satisfied by imported sources. Thus, China is a net importer of virtual water. Russia and South Korea are main importers of China's virtual water, while India and Indonesia are the main exporters of virtual water for China. Analysis demonstrates that exported virtual water in China's coastal, inland, northeast, northwest, and southwest regions decreases successively. As for the industry structure of traded virtual water footprints in China, the agriculture/forestry/animal husbandry/fishery industry is the largest export sector, while the food and tobacco industry, the construction industry, and other service industries are the top three virtual water import sectors.

Keywords: input-output analysis; virtual water footprint; import and export trade; the Belt and Road

收稿日期: 2019-05-28; 修回日期: 2019-06-12

通讯作者: 杨志峰, 中国工程院院士, 主要研究方向为环境生态保护与修复; E-mail: zfyang@bnu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“‘一带一路’中我国城市生态系统健康诊断与提升战略研究”(2017-XY-23)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

在“一带一路”倡议的促进下，国际贸易深化发展，大量商品和服务的交换活动，隐含着商品生产过程中各个环节产生的直接和间接环境影响。隐含环境影响内嵌在商品和服务中并在全球多区域贸易中流动，其中包括虚拟水资源的国际流动。

我国水资源安全形势十分严峻，人均水资源占有量、人均可利用水量低，随着国家社会经济的发展，缺水矛盾逐渐凸显出来，水资源短缺成为我国西北和北方地区面临的最主要的生态环境和社会经济问题之一，维持水资源的可持续利用是可持续发展的必然选择。虚拟水是 20 世纪 90 年代中期提出的新概念，指生产商品和服务所需要的水资源数量 [1]。

目前，虚拟水贸易是国内外研究的热门话题，在商品交易或服务贸易发展的过程中，虚拟水以“无形”的形式寄存在这些商品和服务中，通过模型分析虚拟水贸易有助于识别各个地区的主要贸易部门，充分发挥各地区的产业优势，缓解水资源短缺问题，为解决我国区域水安全问题提供新思路的同时，从全球尺度上进一步缓解水资源压力 [2]。

二、贸易虚拟水的相关文献回顾

利用投入产出表与水资源的消耗关联，构建水资源投入产出模型测度各产业部门、区域和区域间的水足迹以及虚拟水贸易流量，是度量区域间水资源转移消耗的重要手段。为了明确国际上水资源利用的责任，Arto 等 [3] 研究表明贸易使国际虚拟水发生了转移，欧盟 27 国是最大的虚拟水进口国，中国和印度是主要的虚拟水出口国。吴兆丹等 [4] 利用多区域投入产出模型分析我国省区虚拟水流动的空间、部门及需求格局，中国大多数省区虚拟水流出主要流向国内其他省区，多数省区的虚拟水流入也主要源自国内其他省区。研究显示北京通过用水效率方面的改进和虚拟水贸易，成为虚拟水净进口地区，实现水资源安全合理配置 [5]。Okadera 等 [6] 通过评估中国辽宁省能源供应的水足迹，发现辽宁省能源供应取决于邻近省份的水资源，为保证未来区域能源安全，通过节水发电和部门间水资源分配

实现水资源的有效管理非常重要。

仅利用直接用水系数与综合利用完全用水系数、关联度等指标对产业用水特性进行分析所得的结果存在较大差异，评价部门用水特性时应力求全面 [7]。周姣等 [8] 充分考虑新鲜水资源使用量和废水排出量，通过构造“价值型-实物型”混合投入产出表，准确得出各行业及区区间区域贸易调水量，以及虚拟废水对生产地或国家环境带来的一些负面影响。

目前，针对中国与“一带一路”各地区的虚拟水贸易的研究不足，尤其是追踪中国省区与各个国家的虚拟水贸易的研究较少，在产品的生产和消费各个环节中均消耗数量不等的水资源。因此，在现有的研究基础上，本文分别从生产者和消费者两大视角出发，把所有的虚拟水贸易依据产品的生产供应链及消费地进行分配，基于多区域投入产出方法，运用投入产出表链接方法，将中国区域间的投入产出表与世界地区间投入产出表进行链接，建立了“城市-国家-世界”多区域尺度的逐级嵌套模型，精准追踪“一带一路”沿线区域、国家及全球区域尺度上的产品和服务交流产生的虚拟水流动及转移，试图回答以下几个问题：“一带一路”倡议对中国水资源安全是否有利？哪个区域是虚拟水足迹最主要的来源地及目的地？何种行业水资源管理需要进一步加强？以上问题对“一带一路”倡议下中国积极参与虚拟水贸易、构建全球化的水资源安全新战略提供有力的科学依据，具有重要的战略意义。

三、研究方法与数据来源

（一）G-MRIO 模型建立及数据库搭建

多区域投入产出（MRIO）方法能系统地分析产品或服务的区域间流动中所隐含的生命周期对环境的影响，能分析地区尺度和行业尺度上隐含环境账户的贸易关系和来源与去向，区分净生产者和净消费者，是可持续性评价、产业生态等研究领域的重要方法之一。本研究采用中国科学院地理科学与资源研究所编制的《中国 30 省区市 30 部门区域间投入产出表》，有 2007 年和 2010 年两个版本，是目前可获取的最新、精度最高的中国省区间投入产出表。该表的国际进口和出口部分分别采用一行和一列的方式给出，保留了很好的与世界 MRIO 表的接口，方便与国际 MRIO 表的链接。在世界投

入产出部分，采用了欧盟编制的国际投入产出大样本 (WIOD) 数据库，通过链接技术，即对于中国省区间 MRIO 表中的每一个地区 p 的 i 部门出口到世界 MRIO 表中 s 地区的 j 部门的估算，采用世界 MRIO 表中中国大陆地区 C 的 i 部门出口到 s 地区的 j 部门的量所占中国大陆地区 i 部门的总出口的比重，来分解中国省区间 MRIO 中 i 部门的总出口量。并将其中的中国分解为 30 个地区，建立了全球多区域投入产出 (G-MRIO) 模型，该模型已应用于城市和国家碳排放转移研究 [9,10]。

$$T_{ij}^{ps} = \frac{T_{ij}^{Cs}}{\sum_s \sum_j T_{ij}^{Cs}} \sum_s \sum_j T_{ij}^{ps} \quad (1)$$

式 (1) 中， T_{ij}^{ps} 是 p 地区 (中国某省) 的 i 部门出口到 s 地区 j 部门的流出量； T_{ij}^{Cs} 指整个中国出口到 s 地区的值。公式的右边是用中国出口到 s 地区的量占中国总出口的比重，乘以中国某省的总出口量。

基于链接后的 G-MRIO 模型，本研究建立了环境拓展的 W-G-MRIO 模型，用于分析进出口贸易在国家及世界跨尺度上引发的水足迹 (W)。

假设把世界分为 m 个区域，则各个区域的总产出可以表示为：

$$x^r = A^{rr} x^r + y^{rr} + \sum_{s \neq r} A^{rs} x^s + \sum_{s=1}^m y^{rs} \quad (2)$$

与单区域投入产出平衡公式相比，除了包含了中间流量 $A^{rr} x^r$ 、最终需求 y^{rr} ，还包括了从地区 r 流向其他地区的中间需求量 $A^{rs} x^s$ 和最终需求量 y^{rs} 。

综合上述公式，得到 m 个地区的 MRIO 模型的矩阵形式：

$$\begin{pmatrix} x^1 \\ x^2 \\ x^3 \\ \vdots \\ x^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A^{11} & A^{12} & A^{13} & \cdots & A^{1m} \\ A^{21} & A^{22} & A^{23} & \cdots & A^{2m} \\ A^{31} & A^{32} & A^{33} & \cdots & A^{3m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{m1} & A^{m2} & A^{m3} & \cdots & A^{mm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^1 \\ x^2 \\ x^3 \\ \vdots \\ x^m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sum_s y^{1s} \\ \sum_s y^{2s} \\ \sum_s y^{3s} \\ \vdots \\ \sum_s y^{ms} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式 (3) 中，分块矩阵中的每一个子矩阵都表示不同区域之间的贸易流动关系： $A^{rs} = z^{rs} / X^s$ 表示地区 r 到地区 s 之间的工业生产流动， y^{rs} 表示最终消费

的流动。最终消费矩阵的水足迹计算公式如下：

$$f^r = F^1 x^1 + F^2 x^2 + \cdots + F^m x^m \quad (4)$$

F 是单位总产出的耗水量。给出某一地区的最终消费矩阵和最终生产矩阵 (包括本地生产供本地消费和出口到其他地区的最终产品)，则可以分别从消费视角和生产视角计算某一区域的虚拟水贸易：

$$c^r = \begin{pmatrix} y^{1r} \\ y^{2r} \\ y^{3r} \\ \vdots \\ y^{mr} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$p^r = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ y^{rr} + \sum_s y^{rs} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

式 (6) 中， y^{rr} 表示来自于本地区生产的地区 r 的最终消费部分； y^{rs} 指 r 地区向 s 地区输入的最终产品； r 是出口地区； s 是进口地区。

运用 MRIO 模型，则通过最终生产矩阵可以求得生产视角的虚拟水：

$$f_p^r = F(I - A)^{-1} p^r \quad (7)$$

而通过最终消费矩阵可以求得消费视角的虚拟水：

$$f_c^r = F(I - A)^{-1} c^r \quad (8)$$

式 (7)、(8) 中， F 为各区域的虚拟水强度向量， A 表示分块矩阵。

将式 (7)、(8) 中 p^r 和 c^r 都去掉本地生产用于本地最终消费部分 y^{rr} ，即

$$p^{rr} = c^{rr} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ y^{rr} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

通过式 (2) 或式 (3) 的计算, 可以得出本地生产用于本地消费部分的虚拟水 f'' 。于是可以计算出进口和出口的虚拟水:

$$\mathbf{IM} = f_c^r - f'' \quad (10)$$

$$\mathbf{EX} = f_p^r - f'' \quad (11)$$

式 (10)、(11) 中, \mathbf{IM} 和 \mathbf{EX} 分别表示进口和出口的虚拟水排放。虚拟水平衡量定义为某地区的出口贸易虚拟水与该地区进口贸易虚拟水的差值, 计算公式如下:

$$\mathbf{BEET} = \mathbf{EX} - \mathbf{IM} = f_p^r - f_c^r \quad (12)$$

当 \mathbf{BEET} 为正值, 说明所研究区域是一个虚拟水净出口地 (虚拟水净生产者), 反之则为虚拟水净进口地 (虚拟水净消费者)。

(二) 研究范围

“一带一路”是全球开放性区域合作倡议, 因此在界定“一带一路”沿线国家时, 并没有具体的空间局限。本研究主要基于欧盟 WIOD 数据库, 建立了“一带一路”国家及区域分部门的环境数据库, 包括中国周边 14 个典型国家和中国 30 个省份及直辖市。在中国内部, 根据《推动共建丝绸之路经济带和 21 世纪海上丝绸之路的愿景与行动》提出的经济走廊及“21 世纪海上丝绸之路”路线, 将中国 30 个省份及直辖市划分为五大区域。具体的研究范围和分类, 如表 1 所示。

(三) 数据来源

本研究中, 水资源利用采用耗水量 (即绿水和蓝水, 不包括灰水) 的概念, 主要从农业、工业、建筑业、服务业、居民生活五个方面分别进行推算, 其中农业部门的绿水和蓝水主要依据农作物和畜产品的产量及耗水系数进行推算, 其中农作物和畜产品的产量数据分别来自《中国农业年鉴 2011》《中国统计年鉴 2011》, 中国分地区分农作物类型, 分畜产品类型的水足迹、蓝水足迹系数参见文献 [11,12]。

工业分行业耗水量主要依据取水量与废水量差值进行推算, 分行业的取水结构主要参考第二次全国经济普查《中国经济普查年鉴 2008 (能源卷)》。2010 年全国各工业行业废水排放量数据, 主要来自《中国环境统计年鉴 2011》。建筑业和服务业耗水量数据主要根据《中国水资源公报》取水量数据及文献中的耗水强度进行推算 [13]。

四、中国与“一带一路”沿线典型国家进出口贸易虚拟水的测算及结构分析

(一) 总体规模

基于上述模型和数据, 首先对中国与“一带一路”沿线典型国家进出口贸易中的虚拟水总体规模进行评估。2010 年, 中国生产并向“一带一路”沿线典型国家出口的商品中虚拟水达到 17 879.18 Mt (百万吨), 占中国总出口虚拟水 (128 620.72 Mt) 的约 14%, 俄罗斯和韩国是中国虚拟水的主要出

表 1 “一带一路”沿线典型研究范围

范围	分类	具体国家或地区
中国“一带一路”典型地区	西北地区 (6)	山西、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆
	东北地区 (6)	北京、河北、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江
	西南地区 (3)	广西、贵州、云南
	沿海地区 (8)	天津、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、海南
	内陆地区 (7)	安徽、江西、河南、湖北、湖南、重庆、四川
“一带一路”沿线典型国家及区域	东北亚 (2)	俄罗斯、韩国
	东南亚 (1)	印度尼西亚
	南亚 (1)	印度
	中东欧 (10)	保加利亚、捷克、爱沙尼亚、匈牙利、立陶宛、拉脱维亚、波兰、罗马尼亚、斯洛伐克、斯洛文尼亚

口国家；沿线典型国家生产并由中国进口的商品中虚拟水达到 24 210.33 Mt，占中国总进口虚拟水（214 841.30 Mt）的约 11%，印度和印度尼西亚是中国虚拟水的主要进口国。

在虚拟水平衡方面，总体来说，中国是虚拟水净进口国，并且对“一带一路”沿线典型国家总体也是虚拟水净进口国家，意味着中国在进行国际贸易时，国内生产消耗水资源小于消费隐含的虚拟水资源，属于虚拟水的“国内消费、国外承担”模式。但是相对韩国和中东欧国家，中国是虚拟水净出口国，由于出口的商品由中国国内生产并消耗相应的水资源，进口商品则由来源国国内生产并消耗相应的水资源，这意味着，中国在与韩国和中东欧进行贸易时，国内生产耗水量大于消费隐含的耗水量，属于虚拟水的“国内承担、国外消费”模式。

（二）区域结构

中国西北地区、东北地区、西南地区、沿海地区、内陆地区五大区域与“一带一路”沿线典型国家的进出口贸易虚拟水结构如图 1 所示。由图 1 可见，沿海、内陆、东北、西北及西南地区的国内外出口贸易虚拟水依次减少，其中，出口到国内区域的虚拟水的比例分别占该区域总国内外出口虚拟水的 44%、75%、75%、75%、79%，出口到“一带一路”沿线典型国家的虚拟水比例分别占该区域总国内外出口虚拟水的 8%、3%、4%、4%、3%，其中沿海地区是西北、东北、内陆、西南地区虚拟水的主要国内出口地区，东北地区是沿海地区虚拟水的主要国内出口地区，俄罗斯和韩国是国内区域虚拟水的主要出口国家。

沿海、内陆、东北、西北及西南地区的国内外

表 2 中国对“一带一路”沿线典型国家贸易虚拟水的总体规模

国家或区域	中国出口隐含	中国进口隐含	隐含净出口
俄罗斯	4561.99	5780.01	-1218.02
韩国	4421.77	396.88	4024.89
印度尼西亚	2306.44	6221.25	-3914.81
印度	4259.98	10 997.37	-6737.39
中东欧	2329.01	814.83	1514.18
其他所有国家	110 741.54	190 630.97	-79 889.43
“一带一路”典型国家合计	17 879.18	24 210.33	-6331.15
总计	128 620.72	214 841.30	-86 220.58

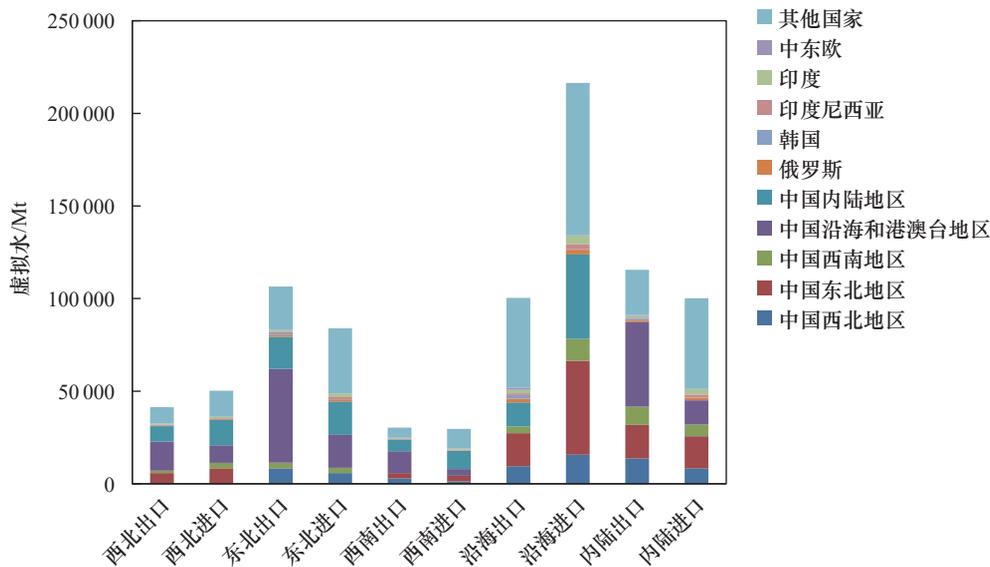


图 1 中国五大地区的国内外贸易虚拟水的区域结构

进口贸易虚拟水依次减少,水资源转移的结构并不平衡。其中,由国内区域进口的虚拟水比例分别占该区域总国内外进口虚拟水的 57%、45%、53%、69%、60%,由“一带一路”沿线典型国家进口的虚拟水比例分别占该区域总国内外出口虚拟水的 5%、6%、5%、4%、4%,其中内陆地区是西北、东北和西南地区主要的虚拟水国内进口区域,东北地区是沿海和内陆地区的主要虚拟水国内进口区域,印度是国内每个区域主要的虚拟水进口国家。

在虚拟水平衡方面,整体上来说,内陆、东北、西南地区属于虚拟水净出口地区,这说明这些地区在与国内外区域进行贸易时,本地生产水资源消耗量大于消费隐含的水资源消耗量,属于虚拟水的“本地承担、外地消费”模式,沿海地区是最大的虚拟水净出口地区;西北地区和沿海地区是虚拟水净进口地区,属于虚拟水的“本地消费、外地承担”模式,西北地区最大的虚拟水净进口地区是内陆地区,沿海地区最大的虚拟水净进口地区是东北地区。值得注意的是,整体上,在中国的五大区域,相对“一带一路”沿线典型国家

来说,都属于虚拟水净进口地区。

(三) 产业结构分析

表 3 列出了中国对“一带一路”沿线典型国家贸易虚拟水的行业结构。其中,农林牧渔业的出口虚拟水达到总出口虚拟水的 87.87%,而进口仅为 5.52%,是最大的虚拟水净出口行业,俄罗斯和韩国是该行业主要的虚拟水出口国家。食品及烟草行业、建筑业、其他服务业是位于前三的虚拟水进口行业,净出口虚拟水分别为 -8017.10 Mt、-3092.80 Mt、-2626.42 Mt,行业虚拟水进口量占总进口虚拟水比例分别为 33.16%、12.87% 和 10.90%,而相应的行业出口虚拟水不足 1%,印度是食品部门和其他服务业的虚拟水净进口国家,俄罗斯是建筑行业的虚拟水净进口国家(见图 2)。

五、结论与政策启示

(一) 结论

总体来说,中国在与“一带一路”沿线典型国

表 3 中国对“一带一路”沿线典型国家的贸易虚拟水行业结构

Mt

行业分类	出口虚拟水	进口虚拟水	净出口虚拟水
农林牧渔业	15 711.11 (87.87%)	1335.50 (5.52%)	14 375.61
采矿业	100.50 (0.56%)	29.23 (0.12%)	71.27
食品及烟草	10.49 (0.06%)	8027.59 (33.16%)	-8017.10
纺织及服装	106.88 (0.60%)	1071.02 (4.42%)	-964.13
木材及家具	9.61 (0.05%)	1242.65 (5.13%)	-1233.04
造纸及印刷	32.23 (0.18%)	203.29 (0.84%)	-171.06
石油及炼焦	18.01 (0.10%)	144.42 (0.60%)	-126.41
化学工业	184.23 (1.03%)	696.89 (2.88%)	-512.66
非金属制品	38.04 (0.21%)	25.72 (0.11%)	12.32
金属及制品	157.81 (0.88%)	144.97 (0.60%)	12.84
设备制造业	28.30 (0.16%)	1209.69 (5.00%)	-1181.39
交通运输设备	18.84 (0.11%)	932.34 (3.85%)	-913.50
电气电子	102.41 (0.57%)	1094.31 (4.52%)	-991.91
其他制造业	19.10 (0.11%)	168.40 (0.70%)	-149.30
公用事业	1284.90 (7.19%)	153.15 (0.63%)	1131.76
建筑业	23.11 (0.13%)	3115.91 (12.87%)	-3092.80
交通	8.89 (0.05%)	296.14 (1.22%)	-287.25
批发和零售业	9.31 (0.05%)	224.45 (0.93%)	-215.14
住宿和餐饮业	2.21 (0.01%)	1455.04 (6.01%)	-1452.83
其他服务业	13.20 (0.07%)	2639.63 (10.90%)	-2626.42

注:括号中的百分数为各行业贸易虚拟水的比重。

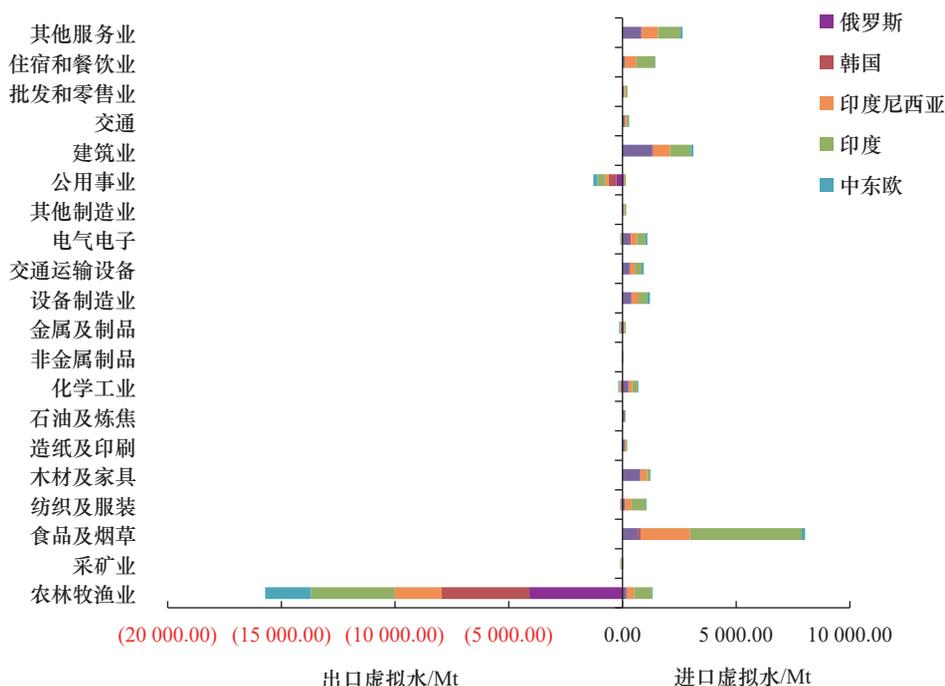


图2 中国对“一带一路”沿线典型国家或地区的进出口贸易虚拟水产业结构

家进行贸易时，国内生产耗水量小于国内消费虚拟水，属于虚拟水的“国内消费、国外承担”模式，是虚拟水净进口国，“一带一路”倡议对中国水资源安全结构起到了一定的补充作用。

从虚拟水最主要的来源地及目的地来看，俄罗斯和韩国是中国的主要虚拟水出口国，印度和印度尼西亚是中国的主要虚拟水进口国。但是相对韩国和中东欧国家，中国是虚拟水净出口国，属于虚拟水的“国内承担、国外消费”模式。在中国内部各大区域与“一带一路”沿线典型国家进行贸易时，整体上属于虚拟水净进口地区。但是中国五大区域除沿海地区外，相对韩国、中东欧属于虚拟水净出口地区，属于虚拟水的“本地承担、外地消费”模式。

中国沿海、内陆、东北、西北及西南地区的国内外出口贸易虚拟水依次减少，44%~79%的出口虚拟水主要流入到国内区域，其中沿海和东北地区是虚拟水主要流入地，3%~8%的出口虚拟水流入到“一带一路”沿线典型国家，韩国和俄罗斯是主要虚拟水出口国。57%~69%的进口虚拟水来自国内区域，内陆和东北地区是虚拟水主要进口地区，印度是主要虚拟水进口国。

在贸易虚拟水行业结构中，农林牧渔业是最大的虚拟水净出口部门，俄罗斯和韩国是该部门主要

的虚拟水出口国家。食品及烟草行业、建筑业、其他服务业是位于前三的虚拟水净进口部门，印度是食品及烟草行业和其他服务业的虚拟水净进口国，俄罗斯是建筑部门的虚拟水净进口国。对上述行业的水资源管理需要进一步加强，重视其波动情况，保障我国水资源安全。

(二) 政策启示

张晓宇等 [14] 发现虚拟水主要由发展中经济体流向发达经济体，国际贸易和分工的现状导致发达工业化国家对以中国为代表的新兴经济体水资源占用，将进一步加剧新兴经济体水资源短缺的现状。而中国在与“一带一路”沿线典型国家进行贸易时，整体来看，属于虚拟水净进口国，因此，深化“一带一路”倡议贸易合作对于我国水资源安全配置至关重要。在推进“一带一路”倡议的过程中，应注重与沿线国家积极沟通，加强在生态环保方面的合作，消除误解，增进互信，实现“一带一路”协同节水的管理目标。

相对韩国和中东欧国家，中国是虚拟水净出口国。由于农林牧渔业是最大的虚拟水净出口部门，食品及烟草行业、建筑业、其他服务业是位于前三的虚拟水净进口部门，意味着中国在“一带一路”

贸易过程中将继续获得贸易虚拟水的受益, 因此, 应加强与食品及烟草行业、建筑业、其他服务业等虚拟水净进口部门的合作, 促进中国在“一带一路”生产网络中产业结构的升级。

参考文献

- [1] Chapagain A K, Hoekstra A Y. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade [J]. *Journal of Organic Chemistry*, 2002, 11(7): 835–855.
- [2] 龙爱华, 徐中民, 张志强. 虚拟水理论方法与西北4省(区)虚拟水实证研究 [J]. *地球科学进展*, 2004, 19(4): 577–584.
Long A H, Xu Z M, Zhang Z Q. Theory and method of virtual water: A case study of northwest China [J]. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(4): 577–584.
- [3] Arto I, Andreoni V, Rueda-Cantuche J M. Global use of water resources: A multiregional analysis of water use, water footprint and water trade balance [J]. *Water Resources & Economics*, 2016, 15: 1–14.
- [4] 吴兆丹, 赵敏, Upmanu L. 基于多区域投入产出的我国省区虚拟水流动格局研究 [J]. *河海大学学报(哲学社会科学版)*, 2016, 18(6): 62–69.
Wu Z D, Zhao M, Upmanu L. Pattern of provincial virtual water flow in China based on multi-regional input-output analysis [J]. *Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences)*, 2016, 18(6): 62–69.
- [5] Wang Z, Huang K, Yang S, et al. An input-output approach to evaluate the water footprint and virtual water trade of Beijing, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 42(3): 172–179.
- [6] Okadera T, Geng Y, Fujita T, et al. Evaluating the water footprint of the energy supply of Liaoning Province, China: A regional input-output analysis approach [J]. *Energy Policy*, 2015, 78: 148–157.
- [7] Rashid M H. Economy-wide benefits from water-intensive industries in South Africa: Quasi-input-output analysis of the contribution of irrigation agriculture and cultivated plantations in the Crocodile River catchment [J]. *Development Southern Africa*, 2003, 20(2): 171–195.
- [8] 周姣, 史安娜. 区域虚拟水贸易计算方法及实证 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2008, 18(4): 184–188.
Zhou J, Shi A N. Method for calculating virtual water trade and demonstration [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2008, 18(4): 184–188.
- [9] 孟凡鑫, 苏美蓉, 胡元超, 等. 中国及“一带一路”沿线典型国家贸易隐含碳转移研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(4): 18–26.
Meng F X, Su M R, Hu Y C, et al. Embodied carbon in trade of China and typical countries along the “Belt and Road” [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2019, 29(4): 18–26.
- [10] Meng F X, Liu G Y, Hu Y C, et al. Urban carbon flow and structure analysis in a multi-scales economy [J]. *Energy Policy*, 2018, 121: 553–564.
- [11] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products [R]. Delft: Value of Water Research Report Series No. 47, UNESCO-IHE, 2010.
- [12] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. The green, blue and grey water footprint of farm animals and animal products [R]. Delft: Value of Water Research Report Series No. 48, UNESCO-IHE, 2010.
- [13] Zhao X, Liu J G, Liu Q Y, et al. Physical and virtual water transfers for regional water stress alleviation in China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(4): 1031–1035.
- [14] 张晓宇, 何燕, 吴明, 等. 世界水资源转移消耗及空间解构研究——基于国际水资源投入产出模型 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2015 (S2): 89–93.
Zhang X Y, He Y, Wu M, et al. World water transfer consumption and spatial deconstruction research—Based on international water input-output model [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2015 (S2): 89–93.