

何国华, 赵勇, 秦长海, 等. 比较优势视角下我国虚拟水流动归因分析[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(1): 1-11. HE G H, ZHAO Y, QIN C H, et al. Attribution analysis of virtual water flow in China from the perspective of comparative advantage[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(1): 1-11. (in Chinese)

比较优势视角下我国虚拟水流动归因分析

何国华, 赵勇, 秦长海, 李激, 姜珊, 李雯晴

(中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要:虚拟水是近年来水资源领域的研究热点, 而相关研究成果主要集中于虚拟水转移的规模核算及其特征分析, 对虚拟水转移的动力成因较少讨论, 所以借助比较优势理论中的区位商、增长商指数, 量化解析农林牧渔业、工业、建筑业、批发零售业、交通运输业、住宿餐饮业、金融业、房地产业、其他服务业 9 大行业的发展优势及增长潜力, 并分析这 9 大行业虚拟水流动格局与行业比较优势的相关关系。研究结果表明: 各行业虚拟水流动格局与行业比较优势具有明显关联, 2002—2017 年我国 72% 的虚拟水会从具有比较优势的地区向不具备优势的地区转移, 71% 的虚拟水转移量会受到行业发展速度影响。研究成果预期可为我国水资源宏观管理及节水政策制定提供理论依据及决策参考。

关键词:虚拟水战略; 行业比较优势; 相关性; 增长商; 区位商

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0001

20 世纪 90 年代, 英国学者 Allan^[1] 提出虚拟水概念, 用以衡量经济社会系统生产商品或提供服务过程中所消耗的水资源数量^[2]。基于此概念引申的虚拟水战略是指贫水国家或地区通过贸易的方式, 从丰水国家或地区购买水资源密集型产品, 用以实现自身产品供给和水安全保障^[3-4]。近年来, 虚拟水相关研究已经成为国内外水资源领域的研究热点: 2002 年 12 月第一次关于虚拟水的国际专家会议在荷兰代尔夫特举行; 2003 年在日本京都召开的“世界水论坛”对虚拟水贸易进行了专题讨论^[5]; 2006 年 8 月在斯德哥尔摩举办的“世界水周”对虚拟水相关理论进行了进一步研讨; 2008 年和 2012 年 *Nature* 和 *Science* 分别开辟专栏讨论虚拟水与经济社会发展的关系^[6-7]。通过 Web of Science 和中国知网数据库分别对国际和国内虚拟水相关研究进行检索, 发现截至 2023 年 5 月国内外以虚拟水为主题的科研论文数量已经达到 29 471 篇, 并且呈现逐年增加的趋势。

尽管虚拟水已经成为水科学领域的研究热点, 但通过梳理近 20 年国内外虚拟水相关研究成果, 发现虚拟水战略并非在所有缺水国家或地区都能适用, 并且同样严重缺水的地区甚至会表现出截然相

反的特征。例如: Feng 等^[8] 发现印度、巴基斯坦、埃及等国家的虚拟水流出量约占全球总量的 1/4, 而这些国家均存在不同程度的水资源压力。相反, 水资源相对丰富的日本、荷兰、俄罗斯则是虚拟水输入区。檀勤良等^[9] 研究发现, 同样是严重缺水地区, 北京和天津是虚拟水输入区, 而新疆、内蒙古和甘肃却是虚拟水输出区。此外, 20 世纪 90 年代我国粮食贸易格局由“南粮北运”转变为“北粮南运”, 这也意味着大量虚拟水依托粮食贸易从水资源相对贫乏的北方向水资源相对丰富的南方转移^[10-11]。虚拟水战略与现实供用水格局的差异, 导致近年来虚拟水研究出现一些争议: 一方面, 部分学者^[12-14] 认为虚拟水战略是解决区域水资源短缺的可行举措, 通过产业结构调整等措施优化贸易模式, 实现更大尺度的水资源优化配置, 将会有效解决区域缺水问题; 另一方面, 部分研究^[15-16] 认为虚拟水战略无法反映真实情况, 违背了经济学中的资源优化配置原则, 是一种有一定缺陷的理论。

比较优势理论是国际贸易理论的基石, 而 Allan 等提出的虚拟水战略可看作是比较优势理论在水资源领域的一种衍生, 即通过贸易使虚拟水从

收稿日期: 2023-08-24 修回日期: 2023-10-25 网络出版时间: 2024-01-10

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240109.1044.014>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3200204); 国家自然科学基金项目(52025093; 52109042)

作者简介: 何国华(1990—), 男, 甘肃庆阳人, 高级工程师, 博士, 主要从事国家水网、水-能源-粮食纽带关系研究。E-mail: hegh@iwhr.com

通信作者: 赵勇(1977—), 男, 安徽宿州人, 正高级工程师, 博士, 主要从事水循环演变、水资源高效利用与国家水网研究。E-mail: zhaoyong@iwhr.com

水资源相对丰富的区域流向相对缺乏的区域。然而,贸易过程是受多种因素影响、具有多个约束目标的复杂系统,贸易活动中各个区域的真实比较优势是多个条件共同作用的结果。虚拟水战略仅以水资源要素作为比较优势理论的立足点,忽略了诸如科技进步、劳动力投入、资本投入等因素的影响,因而造成虚拟水战略与现实情况脱节^[17-18]。尽管大家已经意识到虚拟水战略存在局限与产业比较优势考虑不足有关,但目前的研究较少系统分析虚拟水贸易与区域比较优势之间的关系。基于此,选取我国的 31 个省级行政区为研究区,利用投入产出表分析了 2007 年、2012 年和 2017 年我国农林牧渔业、工业、建筑业、批发零售业、交通运输业、住宿餐饮业、金融业、房地产业、其他服务业的虚拟水流动格局,并利用区位商指数和增长商指数量化识别了 9 个行业的比较优势与虚拟水流动格局的关系。研究结果可为虚拟水相关研究提供理论支撑,并可为我国水资源管理提供参考。

1 研究方法数据来源

1.1 虚拟水流动规模核算

引入多区域投入产出模型对各省级行政区虚拟水流动特征进行分析识别。该方法以选取的 31 省 42 部门投入产出表为基础,通过计算不同行业部门的直接消耗矩阵、直接用水系数和完全用水系数,结合各地区商品流通状况最终量化各地区虚拟水通量。目前,投入产出分析法已经成为研究虚拟水流动的主要方法被广泛采用^[19-20]。

多区域投入产出模型的核心是多区域投入产出表,在考虑 M 个地区和 N 个经济部门的贸易系统中,区域投入产出表可表示为

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \\ \vdots \\ x_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & \cdots & L_{1M} \\ \vdots & & \vdots \\ L_{M1} & \cdots & L_{MM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \\ \vdots \\ x_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y_{11} + \sum y_{1s} + e_{x_1} \\ \vdots \\ y_{mm} + \sum_{m \neq s} y_{ms} + e_{x_m} \\ \vdots \\ y_{MM} + \sum y_{Ms} + e_{x_M} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X}([x_1 \cdots x_m \cdots x_M]^T)$ 代表各省级行政区的产出; 矩阵 \mathbf{L} 为中间投入系数矩阵,表示生产过程中的中间投入; y_{mm} 是 m 省级行政区各部门的本地最终消

费; y_{ms} 代表 m 省级行政区各部门产品输出到 s 省级行政区的最终消费; e_{x_m} 是 m 省级行政区各部门产品出口到其他国家的最终消费。

由于本文研究的是省际虚拟水流动,因此有必要引入进口系数矩阵来消除进口量。在多区域投入产出表中,进口量包含在中间使用和最终使用矩阵中,因此需要进行如下计算。

计算各部门的直接消耗系数。直接消耗系数(a_{pq})是指 q 产业生产单位产品过程中 p 产业对其的直接投入量,可表示为

$$a_{pq} = \frac{x_{pq}}{x_q} \quad (2)$$

式中: x_{pq} 为 p 产业提供给 q 产业的产品或服务数量,万元; x_q 为 q 产业的生产总投入,万元。

其次,量化各部门的直接用水系数($f_q, \text{m}^3/\text{万元}$),直接用水系数反映 q 行业生产过程中的用水情况,即行业生产用水量与总产出的比值,表达式为量与总产出的比值,表达式为

$$f_q = \frac{W_q}{X_q} \quad (3)$$

式中: W_q 为 q 行业的用水量, m^3 ; X_q 为 q 行业的总产出,万元。

建立进口系数矩阵。为了消除进口量,需建立进口系数矩阵 \mathbf{I}_M , 表达式为

$$\mathbf{I}_M = [\mathbf{I}_{M_{kj}}] \quad (4)$$

$$\mathbf{I}_{M_{kj}} = \mathbf{I}_{kj} / (\mathbf{T}_{IU_{kj}} + \mathbf{T}_{FU_{kj}}) \quad (5)$$

式中: $\mathbf{I}_{M_{kj}}$ 是 k 地区 j 部门的进口系数; \mathbf{I}_{kj} 为 k 地区 j 部门进口的经济总量; $\mathbf{T}_{IU_{kj}}$ 是 k 地区 j 部门的中间使用总量; $\mathbf{T}_{FU_{kj}}$ 是 k 地区 j 部门的最终消费总量。

完全用水系数($f_q^*, \text{m}^3/\text{万元}$)反映 q 行业生产过程中直接消耗的水资源量和间接消耗的虚拟水量,可通过直接消耗系数和直接用水系数推算得出,表达式为

$$f_q^* = \sum f_q [\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \mathbf{I}_M)\mathbf{A}]^{-1} \quad (6)$$

式中: \mathbf{I} 为 n 阶单位矩阵; $\mathbf{A} = \{a_{pq}\}_{n \times n}$ 为直接消耗系数矩阵。

结合上述计算公式,可得到各地区虚拟水流动情况,表达式为表达式为

$$V_{W_{in}} = \sum_{q=1}^n \mathbf{I}_q f_q^* \quad (7)$$

$$V_{W_{out}} = \sum_{q=1}^n \mathbf{O}_q f_q^* \quad (8)$$

$$V_{W_{net}} = V_{W_{in}} - V_{W_{out}} \quad (9)$$

式中: $V_{W_{in}}$ 为某一地区虚拟水流入量, m^3 ; $V_{W_{out}}$ 为某一地区虚拟水流出量, m^3 ; I_q 为某一地区第 q 业的产品或服务的进口规模, 万元; O_q 为某一地区第 q 产业产品或服务的出口规模, 万元; $V_{W_{net}}$ 为虚拟水净流入量, m^3 , $V_{W_{net}}$ 为正数表示该地区为虚拟水净流入区, $V_{W_{net}}$ 为负数表示该地区为虚拟水净流出区。

1.2 行业比较优势

采用区位商指数和增长商指数来衡量行业的比较优势。区位商指数(L_Q)又称专门化率或地方专业化指数, 是反映某一行业发展优、劣势的重要指标, 目前已广泛应用于产业结构转型、经济联系测度等方面研究^[21-22]。根据 L_Q 计算公式的含义, L_Q 值越大, 意味着该行业的集中度和专业化水平就越高, 比较优势就越明显。 $L_Q < 1$, 表明行业在区域内的比较优势不明显; $L_Q \geq 1$, 表明产业发展水平在区域平均水平之上, 该产业具有比较优势; $L_Q > 1.5$, 表明该产业比较优势达到较高水平。 L_Q 计算公式为

$$L_Q = \frac{y_{ij}/y_i}{Y_j/Y} \quad (10)$$

式中: y_{ij} 表示第 i 个地区中 j 产业的产值, 万元; y_i 表示第 i 个地区的总产值, 万元; Y_j 表示全国 j 产业的产值, 万元; Y 表示全国总产值, 万元。

考虑到区位商指数是一个静态指标, 难以反映区域产业的增长潜力。为了描述区域产业结构的演变趋势, 引入增长商指数(G_Q)。所谓增长商是将某时段第 i 个地区中 j 产业的增长速度与全国 j 产业的平均增长速度进行比较。 $G_Q > 0$, 表明该产业增长速度大于全国平均水平, 产业优势处于增长态势, 反之则产业优势处于下降态势。 G_Q 计算公式为

$$G_Q = \frac{y_{ij}(t)/y_{ij}(t_0)}{Y_j(t)/Y_j(t_0)} - \frac{\sum_{j=1}^n y_{ij}(t) / \sum_{j=1}^n y_{ij}(t_0)}{\sum_{j=1}^n Y_j(t) / \sum_{j=1}^n Y_j(t_0)} \quad (11)$$

式中: $y_{ij}(t)$ 和 $y_{ij}(t_0)$ 分别表示研究时段末期和初期第 i 个地区中 j 产业的产值, 万元; $Y_j(t)$ 和 $Y_j(t_0)$ 分别表示研究时段末期和初期全国 j 产业的产值, 万元; n 表示产业数量, 本研究中 $n=9$, 分别表示农林牧渔业、工业、建筑业、批发零售业、交通运输业、住宿餐饮业、金融业、房地产业、其他服务业 9 个行业。

1.3 相关性检验

为检验虚拟水流动与产业比较优势的相关性, 采用 Pearson 相关系数进行相关性检验。Pearson 相

关系系数是目前学术界普遍采用的相关性检验方法, 具有计算方法简单、对异常值不敏感等优点。Pearson 相关系数(r)定义为两个变量之间的协方差和标准差的商, r 为正表明正相关, 为负表明负相关。相关程度的强弱可通过 r 的绝对值进行判断: r 绝对值为 (0.8, 1.0], 表示极强相关; r 绝对值为 (0.6, 0.8], 表示强相关; r 绝对值为 (0.4, 0.6], 表示中等程度相关; r 绝对值为 (0.2, 0.4], 表示弱相关; r 绝对值为 [0, 0.2], 表示极弱相关或不相关。 r 表示为

$$r = \frac{\sum(L - \bar{L})(M - \bar{M})}{\sqrt{\sum(L - \bar{L})^2} \sqrt{\sum(M - \bar{M})^2}} \quad (12)$$

式中: L 和 M 分别为 2 个变量的变量值; \bar{L} 和 \bar{M} 分别为 2 个变量的均值。

1.4 数据来源

经济数据来源于 2007 年、2012 年和 2017 年全国及各省级行政区投入产出表, 并参考国民经济行业分类标准(GB/T 4754—2017), 将原表中的 42 个行业部门合并成农林牧渔业、工业、建筑业、批发零售业、交通运输业、住宿餐饮业、金融业、房地产业、其他服务业 9 个行业部门。为消除价格变动的影响, 利用价格指数将投入产出表中的资金流量统一折算为 2007 年基准可比价格。各地区用水总量数据来源于《中国水资源公报》和各省级行政区水资源公报, 各行业用水数据依托《中国水资源公报》《中国经济普查年鉴》进行分解汇总。

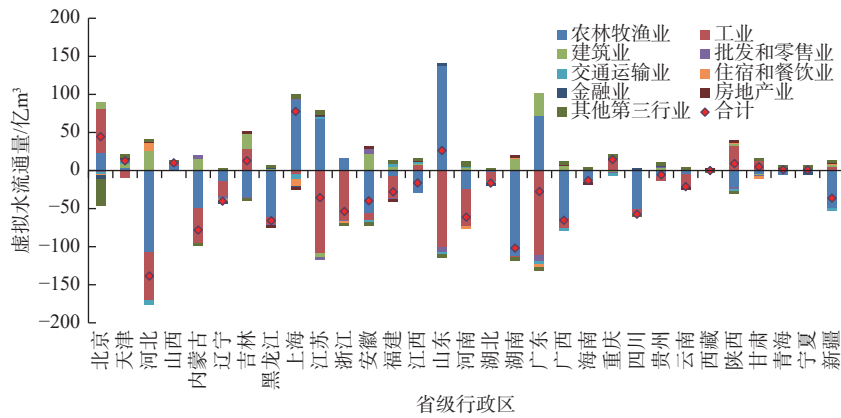
2 结果分析

2.1 虚拟水流动格局

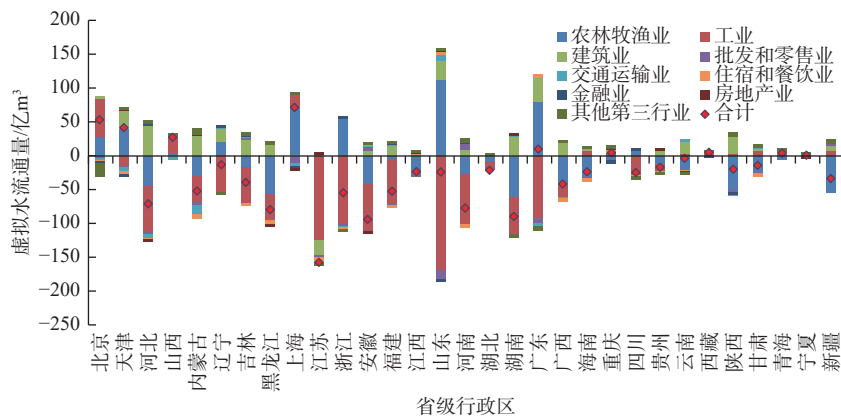
选取的我国的 31 个省级行政区 2007 年、2012 年和 2017 年虚拟水流动格局见图 1。从图 1 可以看出人口密度大、经济发展水平较高的省级行政区更多作为虚拟水输入区, 而农业发达的省级行政区更多是虚拟水输出区。2007 年以来, 北京、上海、天津和重庆这 4 个直辖市一直是虚拟水净输入区; 2017 年北京、上海、天津和重庆的净虚拟水输入量分别达到 87 亿、53 亿、37 亿和 23 亿 m^3 , 分别占各市当年实体水用水总量的 219%、51%、135% 和 30%。虚拟水输出区主要集中在重要商品粮基地所在的河北、黑龙江、湖南和四川等地, 畜牧业较为发达的内蒙古, 以及特色瓜果基地所在的广西、海南、新疆等地。2017 年, 虚拟水输出规模排名前 3 的省级行政区分别是黑龙江、内蒙古和广西, 输出量分

别是 87 亿、57 亿和 48 亿 m^3 。2007 至 2017 年,部分省级行政区的虚拟水流动特征出现了反转,例如,浙江和广东 2007 年是虚拟水输出区,输出规模分别

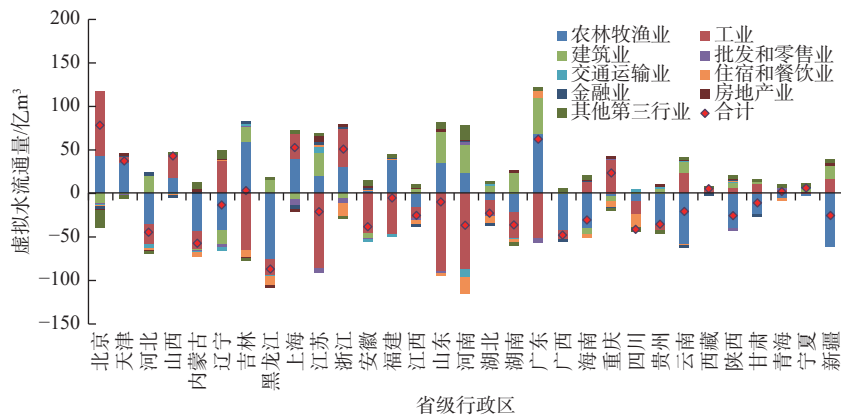
达到 54 亿和 28 亿 m^3 ,2017 年这 2 个省皆转变为虚拟水输入区,与此同时,陕西和甘肃则从 2007 年的虚拟水输入区转变为 2017 年的虚拟水输出区。



(a) 2007年我国的31个省级行政区不同行业虚拟水流动通量



(b) 2012年我国的31个省级行政区不同行业虚拟水流动通量



(c) 2017年我国的31个省级行政区不同行业虚拟水流动通量

图 1 选取的我国的 31 个省级行政区不同行业虚拟水流动通量

Fig. 1 Virtual water flux of different industries in 31 provincial administrative regions of China

近年来,我国不同行业的虚拟水转移特征发生了明显变化,其中农林牧渔业表现为虚拟水输出区更加集中:2007 年,农林牧渔业虚拟水输出区主要集中在东北地区、西北地区、西南地区、黄淮海平原和江汉平原的部分省级行政区;2017 年,东北、西北和西南地区的农林牧渔业虚拟水输出量持续增加,而黄淮海平原和江汉平原部分的虚拟水输出则

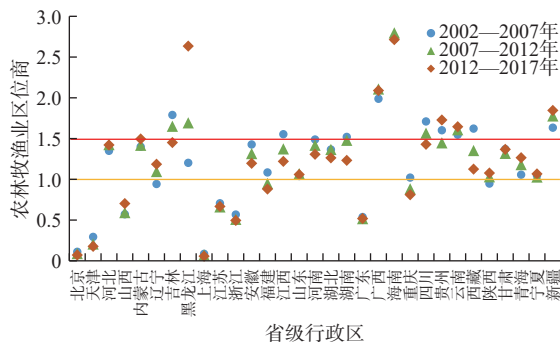
有所减少。工业表现为虚拟水输出规模明显下降,2007 年,我国工业虚拟水净输出量为 509 亿 m^3 ,而 2017 年这个数据则大幅下降到 296 亿 m^3 ,江苏、山东和广东等东部地区是我国工业虚拟水的主要输出区,这 3 个省份的虚拟水输出量分别从 2007 年的 108 亿、100 亿和 112 亿 m^3 减少到 2017 年的 86 亿、89 亿和 51 亿 m^3 。与工业相反,2007—2017 年我国建筑

业虚拟水输入规模则明显增加,建筑业虚拟水净输入量从2007年的164亿 m^3 增加到2017年的214亿 m^3 ,增幅超过30%。与第一、二产业相比,第三产业各行业虚拟水转移规模普遍较小,且表现出逐渐分散的特征。2007年我国第三产业虚拟水输出区主要集中在北京、上海和广东这些经济相对发达的地区,而2017年北京、上海和广东的第三产业虚拟水输出量有所减少,与此同时浙江、湖南、四川等地区的第三产业虚拟水输出量则有所增加。横向对比来看:2017年上海是我国最大的批发和零售业、金融业虚拟水输出区;河南是最大的交通运输业、住宿和餐饮业虚拟水输出区;北京则是最大的是房地产业和其他第三产业虚拟水输出区。

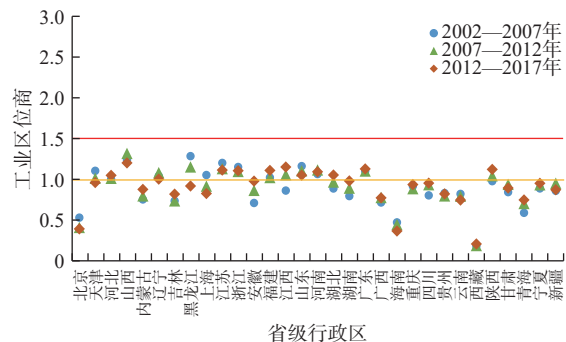
2.2 行业比较优势分析

为了与虚拟水研究时段相协调,研究分析2002—2017年不同行业的比较优势见图2,图中区位商大于等于1表明行业具备比较优势,区位商大于1.5表明行业具备较大比较优势。从图2可以看出:北京、天津和上海始终是我国农林牧渔业区位商指数较小的地区,表明这些区域农业发展始终不占据优势;广西、海南、云南和新疆等地区农林牧渔业区位商指数始终大于1.5,表明这些区域农业优势地位突出,且较为稳定。2002—2007年黑龙江农林牧渔业具有比较优势,但优势并不突出(平均区位商指数为1.20),随着近年来国家粮食主产区和商品粮基地的建设,黑龙江农业迅速发展,2012—2017年

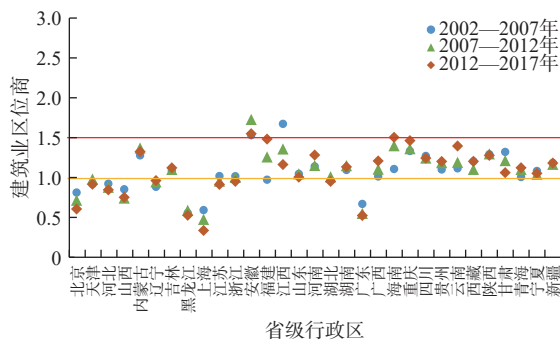
农林牧渔业区位商指数已经达到2.78,是我国农业发展优势最突出的地区。2002—2017年各省级行政区工业区位商指数没有出现较大的年际波动。从整体来看:江苏、浙江、福建、山东、河南、广东等东部地区是我国工业发展的优势地区,这些地区2002—2017年工业区位商指数始终大于1.0;黑龙江、天津、上海等地近年来工业发展优势有所下降;西北地区工业发展优势则呈现增长态势。建筑业比较优势表现出明显的区域差异,中、西部地区建筑业区位商指数普遍高于东部地区,北京、上海、广东是我国建筑业比较优势最低的地区,2012—2017年其区位商指数仅分别为0.61、0.34、0.52。批发和零售业的优势地区相对集中,北方主要集中于北京、天津和山东,南方主要集中于长三角地区所在的上海、江苏、浙江、安徽,以及泛珠三角地区所在的广东、福建、海南、湖南。上海是我国批发和零售业最具发展优势的地区,2012—2017年上海批发和零售业区位商指数达到1.51,是全国唯一区位商指数大于1.5的地区。北京和上海是我国的金融中心,也是金融业比较优势最为突出的地区,2012—2017年北京、上海的金融业区位指数分别为2.43和2.03,远高于其他省级行政区。海南房地产业近年来发展迅速,其区位商指数从2002—2007年的0.87快速增加到2012—2017年的1.54,目前,海南已经超过北京、上海,是我国房地产业最具比较优势的地区。



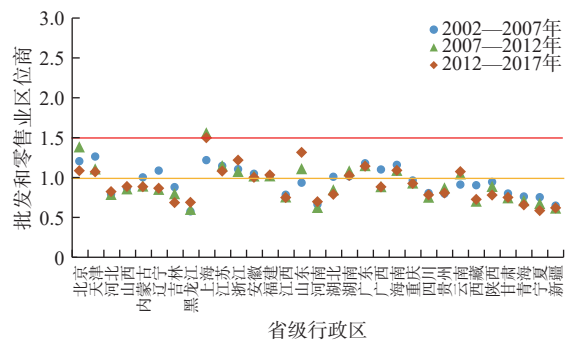
(a) 农林牧渔业区位商演变



(b) 工业区位商演变



(c) 建筑业区位商演变



(d) 批发和零售业区位商演变

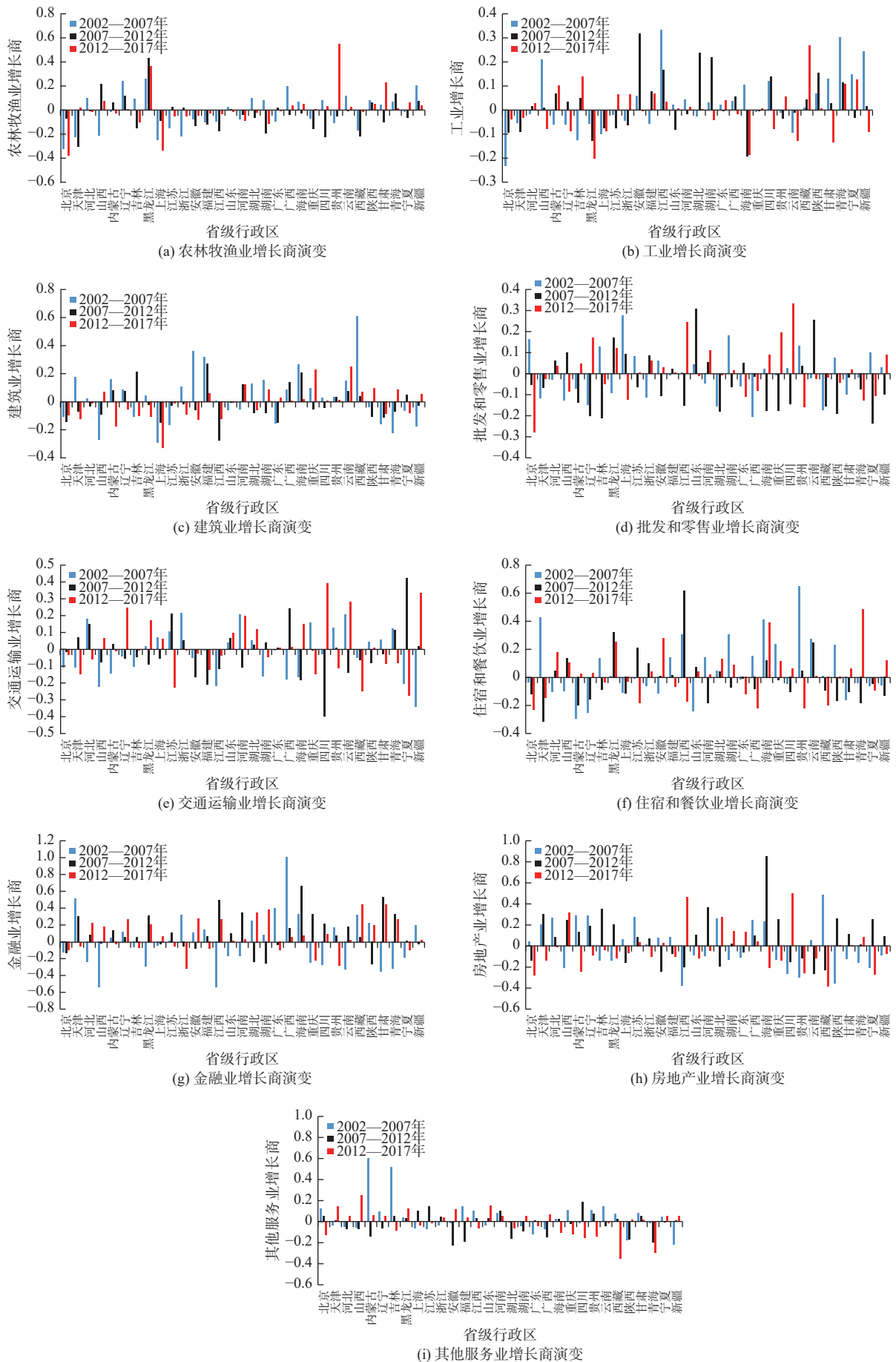


图3 选取的我国的31个省级行政区不同行业增长商演变

Fig. 3 Evolution of growth quotient of different industries in 31 provincial administrative regions of China

2.3 行业比较优势与虚拟水流动格局的相关性

为了识别虚拟水流动格局与行业比较优势的关系,将 2007 年、2012 年和 2017 年各省级行政区不同行业虚拟水转移量与对应行业的区位商指数进行对比,发现符合行业优势区(区位商指数 ≥ 1)虚拟水输出,行业劣势区(区位商指数 < 1)虚拟水输入的省级行政区数量占比(P_1)为 72.0%,其中,农林牧渔业、房地产业的占比约为 80%,其他行业的占比约为 70%,见表 1。这意味着某一行业的优势区往往

是该行业的虚拟水输出区,反之则往往是该行业的虚拟水输入区。对比 2007—2012 年和 2012—2017 年各省级行政区不同行业虚拟水转移变化量与增长商的关系,发现符合行业优势增长区(增长商指数 > 0)虚拟水转移变化量为负,产业优势下降区(增长商指数 < 0)虚拟水转移变化量为正的区域占比(P_2)达到 71.1%,这意味着行业比较优势增强的地区虚拟水主要表现为输出规模增加或输入规模减少,而行业比较优势下降的地区虚拟水主要表现为输出规模减少或输入规模增加。

表 1 2007 年、2012 年和 2017 年各省级行政区虚拟水流动与行业比较优势相关性分析

Tab. 1 Correlation analysis of virtual water flow and industry comparative advantage in provincial administrative regions in 2007, 2012 and 2017

行业	行业优势区域		行业劣势区域		$P_1/\%$	行业优势增强区域		行业优势下降区域		$P_2/\%$
	数量/ 个	虚拟水输出 区域数量/个	数量/ 个	虚拟水输入 区域数量/个		数量/ 个	虚拟水转移量为负 区域数量/个	数量/ 个	虚拟水转移量为正 区域数量/个	
农林牧渔业	66	54	27	19	78.5	27	18	35	24	67.7
工业	37	30	56	35	69.9	34	25	28	23	77.4
建筑业	63	44	30	23	72.0	35	25	27	24	79.0
批发零售业	45	36	48	27	67.7	27	16	35	26	67.7
交通运输业	57	41	36	25	71.0	28	19	34	24	69.4
住宿餐饮业	46	33	47	29	66.7	31	24	31	21	72.6
金融业	26	14	67	52	71.0	41	27	21	16	69.4
房地产业	30	19	63	56	80.6	31	19	31	24	69.4
其他服务业	50	31	43	35	71.0	34	25	28	17	67.7
合计	420	302	417	301	72.0	288	198	270	199	71.1

进一步采用 Pearson 相关系数验证各行业虚拟水流动格局与行业比较优势的相关程度,见图 4。从区位商来看:农林牧渔业、金融业、其他服务业区位商指数与对应行业虚拟水转移量的 Pearson 相关系数分别为-0.67、-0.68 和-0.71,表现出强相关性;而其他行业区位商指数与对应的虚拟水转移量均表现为中等程度相关。从增长商来看:农林牧渔业、住宿和餐饮业、金融业的增长商指数与对应行业的虚拟水转移变化量具有强相关性;其他行业增长商与对应的虚拟水转移变化量尽管相关性较弱,但也达到了中等程度相关。从图 4 可以看出不同行业区位商、增长商与对应的虚拟水转移量、虚拟水转移变化量均呈现负相关关系,这说明:行业比较优势越小,则虚拟水输入量越大,行业比较优势越大,则虚拟水输出量越大;行业比较优势越下降,虚拟水转移变化量越大,行业优势越增强,虚拟水转移变化量则越小。

上述分析证明我国虚拟水流动格局与行业比较

优势具有较为明显的相关性。事实上,通过对比图 1、图 2 和图 3,也可以发现相似的规律。2002 年以来我国东北、西北和西南地区的农林牧渔业比较优势整体较为突出,且增长速度较快,这导致东北、西北和西南地区的农林牧渔业虚拟水输出规模逐渐增加;而安徽、湖南等传统农业大省农林牧渔业比较优势下降,导致其虚拟水输出规模明显减少。目前东部沿海地区的工业发展整体处于较高水平,但近年来增速变缓,这种行业变化格局在虚拟水贸易中体现为东部地区工业虚拟水仍处于输出态势,但输出规模已明显下降。北京、上海、广东等经济发达省级行政区的第三产业比较优势普遍比较突出,但近年来增长速度有所放缓,而浙江、湖南、四川等省级行政区第三产业发展速度则明显加快,这种变化在第三产业虚拟水贸易中则体现为传统经济发达省级行政区虚拟水输出规模下降,新兴经济发达省级行政区虚拟水输出规模增加。

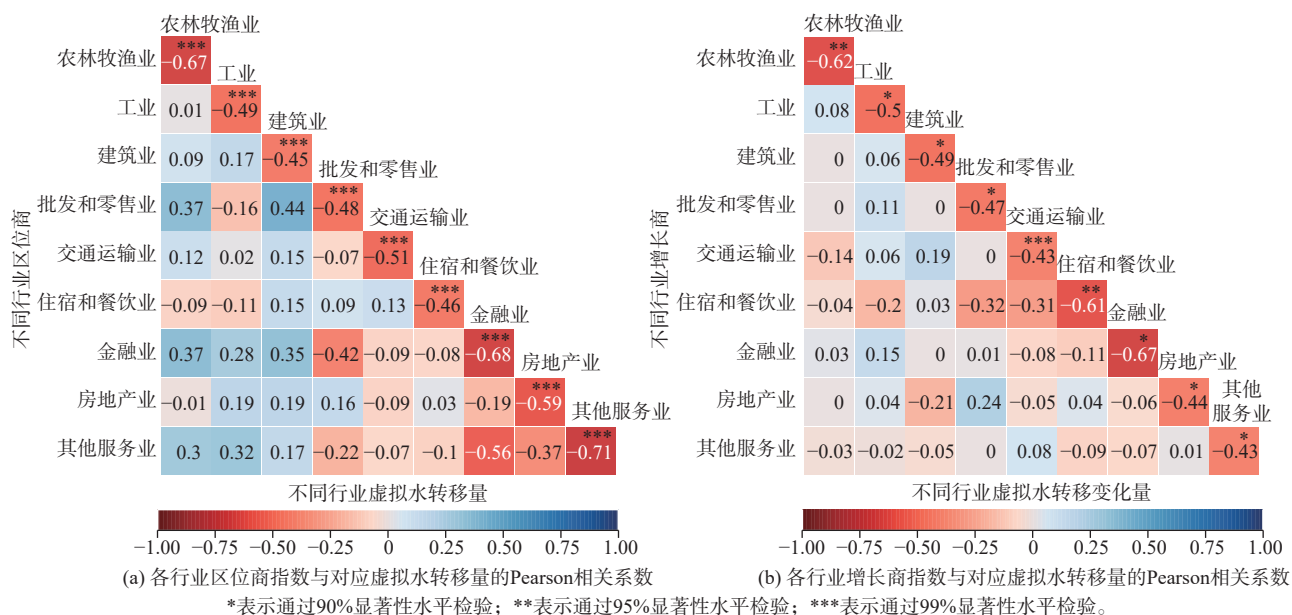


图4 各行业虚拟水流动格局与行业比较优势的 Pearson 相关系数

Fig. 4 Pearson correlation coefficient between virtual water flow pattern of each industry and comparative advantage of the industry

经研究发现,行业比较优势与虚拟水转移格局显著相关,某一行业的虚拟水往往从行业发展的优势区向劣势区转移。根据比较优势理论,对于某种限制性资源,一个国家或地区需要将其应用到某种具有比较优势的行业中才会从中获益^[23]。对水资源来说,缺水地区需要将有限的水资源应用到低耗水、高附加值行业,才能发挥水资源的最大价值。然而低耗水、高附加值行业能否顺利发展,是由区域经济社会发展水平、专业人才集聚程度、交通运输条件等多个要素共同决定的,水资源只是行业发展的众多驱动要素之一^[24-25],这导致同样是缺水地区,有的地区低耗水、高附加值行业能够发展起来,就成为虚拟水输出区,反之则成为虚拟水输入区。例如:北京、天津等部分缺水省级行政区的优势行业是低耗水、高附加值的批发零售业、金融业和房地产业;而新疆、甘肃等缺水省级行政区则是高耗水、低附加值的农林牧渔业。尽管北京、天津、新疆和甘肃都是自身优势行业的虚拟水输出区,但由于农林牧渔业与批发零售业、金融业、房地产业耗水强度的巨大差异,北京、天津与新疆、甘肃则表现出完全相反的虚拟水流动格局。

目前,许多研究关注虚拟水贸易对区域水安全的影响,并提出通过虚拟水战略来解决区域缺水问题。但如果只看结果,很容易得出通过食物进口减少第一产业的用水,将节省下来的水资源用于附加值更高的第二、三产业的结论^[26-27]。事实上,如果不

考虑行业的比较优势,只压缩第一产业用水,而不同时大力培育第二、三产业,很可能导致第一产业节约的水量难以被不具有比较优势的第二、三产业消耗,最终不得不返回第一产业,造成“越节水、越缺水”的恶性循环^[28]。因此,低耗水、高附加值的优势产业能否顺利发展是缺水地区实施虚拟水战略的前提条件。

3 结论

虚拟水是近年来水资源领域的研究热点,但目前国内外研究成果对于缺水地区大量、长期输出虚拟水这一现象无法有效解释,难以支撑水资源管理需求,有必要对我国虚拟水流动格局成因进行深入解析。本文核算了2007年、2012年和2017年我国农林牧渔业、工业、建筑业、批发零售业、交通运输业、住宿餐饮业、金融业、房地产业、其他服务业9个行业虚拟水流动格局,对2002年以来各行业区位商、增长商进行了系统分析,并定量识别了我国虚拟水流动格局与产业比较优势的相关关系,主要结论如下:

通过投入产出表分析近年来我国虚拟水流动格局,发现人口密度大、经济发达的省级行政区更多作为虚拟水输入区,而农林牧渔业发达的地区更多是虚拟水输出区,水资源本底条件与虚拟水流动格局间并无明显关联。

通过核算2002—2017年各行业区位商和增长

商发现:2002 年以来我国东北、西北和西南地区的农林牧渔业比较优势突出,且增长速度较快;东部沿海地区的工业发展处于较高水平,但近年来增速变缓;北京、天津、上海、广东等经济发达省级行政区第三产业增长速度近年来有所放缓,浙江、湖南、四川等省级行政区第三产业发展速度则明显提升。

我国各地区虚拟水流动格局与行业比较优势具有明显的相关性,2002—2017 年符合行业优势区虚拟水输出,行业劣势区虚拟水输入规律的省级行政区数量占总数的 72.0%,符合行业优势增长区虚拟水转移变化量为负,行业优势下降区虚拟水转移变化量为正的省级行政区数量占总数的 71.1%,这意味着行业虚拟水往往从具有比较优势的地区向不具备比较优势的地区转移,且行业比较优势变化会导致虚拟水转移量出现相应改变。进一步采用 Pearson 相关系数验证发现,各行业虚拟水流动格局与行业比较优势的相关性均达到中等程度以上。

参考文献:

- [1] ALLAN J A. Fortunately there are substitutes for water: otherwise our hydro-political futures would be impossible[J]. *Priorities for Water Resources Allocation and Management*, 1993, 13(4): 26.
- [2] 韩昕雪琦, 安婷莉, 高学睿, 等. 我国西北地区主要农作物贸易对区域水资源影响[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(1): 82-97. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0010.
- [3] 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. DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2003.04.006.
- [4] 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[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(2): 44-61. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0026.
- [5] HOEKSTRA A Y. Virtual water trade: proceedings of the international expert meeting on virtual water trade[R]. Netherlands: UNESCO-IHE, 2003.
- [6] 徐中民, 宋晓谕, 程国栋. 虚拟水战略新论[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(2): 490-495. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0058.
- [7] 龙爱华, 邓晓雅, 赵旭, 等. 虚拟水与水足迹国际动态与前沿研究[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2015.
- [8] FENG K, HUBACEK K. A multi-region input-output analysis of global virtual water flows[M]. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2015.
- [9] 檀勤良, 韩健, 刘源. 基于投入产出模型的省际虚拟水流动关联分析与风险传递[J]. *中国软科学*, 2021(6): 144-152.
- [10] 杨婷婷, 张雪妮, 高翔, 等. 中国粮食省份间流通及对虚拟水土资源的影响[J]. *草业科学*, 2022, 39(8): 1686-1697. DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0441.
- [11] JIANG Y, CAI W, DU P, et al. Virtual water in inter-provincial trade with implications for China's water policy[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 87(1): 655-665. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.10.074.
- [12] ZHAO H, QU S, GUO S, et al. Virtual water scarcity risk to global trade under climate change[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 230(1): 1013-1026. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.114.
- [13] GRAHAM N T, HEJAZI M I, KIM S H, et al. Future changes in the trading of virtual water[J]. *Nature Communications*, 2020, 3632(11): 1-7. DOI: 10.1038/s41467-020-17400-4.
- [14] 卓拉, 栗萌, 吴普特, 等. 黄河流域作物生产与消费实体水-虚拟水耦合流动时空演变与驱动力分析[J]. *水利学报*, 2020, 51(9): 1059-1069. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20200336.
- [15] JIA S, LONG Q, LIU W. The fallacious strategy of virtual water trade[J]. *International Journal of Water Resources Development*, 2017, 33(2): 340-347. DOI: 10.1080/07900627.2016.1180591.
- [16] 田贵良. 虚拟水战略的经济学解释: 比较优势理论的一个分析框架[J]. *经济学家*, 2008(5): 39-47. DOI: 10.16158/j.cnki.51-1312/f.2008.05.014.
- [17] 周姣. 区域间虚拟水贸易的有效性及其条件分析[J]. *人民黄河*, 2010, 32(11): 65-67. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2010.11.029.
- [18] 李旭东. 基于虚拟水理论的区域用水结构优化[D]. 扬州: 扬州大学, 2015.
- [19] 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[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(2): 355-364. DOI: 10.11849/zrzyxb.2014.02.017.
- [20] 秦长海, 孙华月, 赵勇, 等. 中国经济社会消费水量、效率及其未来极值[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(1): 76-86. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0009.
- [21] 张耀光, 刘锴, 刘桂春, 等. 基于定量分析的辽宁区域海洋经济地域系统的时空差异[J]. *资源科学*, 2011, 33(5): 863-870.
- [22] 许金菁. 基于区位商指数模型的服务业集聚度测算[J]. *统计与决策*, 2016(11): 63-65. DOI: 10.13546/j.cnki.tjyjc.2016.11.017.
- [23] 李文, 潘英丽. 比较优势、国际贸易和产业结构: 基于比较优势理论的分析[J]. *现代管理科学*, 2011(9): 39-40, 119.

- [24] 周侯勋. 我国经济增长影响因素的探讨: 基于索洛模型的实证分析[J]. *中国市场*, 2015, 21(5): 30-34. DOI: [10.13939/j.cnki.zgsc.2015.21.030](https://doi.org/10.13939/j.cnki.zgsc.2015.21.030).
- [25] 罗岚. 我国资源和环境对经济增长贡献测度[J]. *四川师范大学学报(社会科学版)*, 2012, 39(3): 51-57. DOI: [10.13734/j.cnki.1000-5315.2012.03.021](https://doi.org/10.13734/j.cnki.1000-5315.2012.03.021).
- [26] YE Q, LI Y, ZHUO L, et al. Optimal allocation of physical water resources integrated with virtual water trade in water scarce regions: A case study for Beijing, China[J]. *Water Research*, 2018, 129: 264-276. DOI: [10.1016/j.watres.2017.11.036](https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.036).
- [27] 高向龙, 石辉, 党小虎. 基于投入产出模型的黄河“几字弯”城市群用水特征与节水关键区域[J]. *生态学报*, 2022, 42(24): 10150-10163. DOI: [10.5846/stxb202111113173](https://doi.org/10.5846/stxb202111113173).
- [28] GRAFTON R Q, WILLIAMS J, PERRY C J, et al. The paradox of irrigation efficiency[J]. *Science*, 2018, 361(6404): 748-750. DOI: [10.1126/science.aat9314](https://doi.org/10.1126/science.aat9314).

Attribution analysis of virtual water flow in China from the perspective of comparative advantage

HE Guohua, ZHAO Yong, QIN Changhai, LI Wei, JIANG Shan, LI Wenqing

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In the 1990s, British scholar Allan introduced the concept of virtual water to quantify the water resources consumed in economic activities. Water-scarce countries procure water-intensive products through commerce to ensure supply and water security. With worldwide conferences and forums debating it extensively, virtual water research has acquired at traction. Database searches reveal a total of 29,471 domestic and international research papers on virtual water, showing a consistent growth trend. However, the applicability of virtual water strategy varies across water-scarce regions, leading to debates over its effectiveness. Rooted in the theory of comparative advantage, virtual water strategy overlooks multifaceted influences. Currently, the predominant body of research is centered around the calculation of scale and analysis of characteristics related to virtual water transfer. However, the driving causes of virtual water transfer remain conspicuously scarce.

Incorporated the theory of comparative advantage, the scientific validity and effectiveness of virtual water research were heightened. The virtual water flow patterns of agriculture, forestry, animal husbandry, fishery, industry, construction, wholesale and retail, transportation, accommodation, and catering sectors across Chinese provinces in 2007, 2012 and 2017 were analyzed. Metrics such as the location quotient and growth quotient index were employed to establish the quantitative relationship between the pattern of virtual water flow and industrial comparative advantage.

The results showed that the virtual water flow pattern in China was closely related to the industrial comparative advantage. The location quotient index can explain 72% of China's virtual water transfer volume, while the growth quotient index substantiates 71% of China's virtual water transfer change volume. The location and growth quotients of different industries are negatively correlated with the corresponding virtual water transfer volume and virtual water transfer change volume. This shows that virtual water associated with a specific industry predominantly relocates from regions boasting comparative advantages to those devoid of such advantages, and the speed of industry development may lead to a corresponding change in the magnitude of virtual water transfer.

The prerequisites for implementing virtual water strategies are identified and the scientific value of virtual water research is discussed. The valuable insights into the driving causes of virtual water transfer are also provided and the development of virtual water strategies in China can be informed. By understanding the correlation between virtual water flow patterns and industrial comparative advantage, policymakers can make informed decisions to promote sustainable water resource management.

Key words: virtual water strategy; industrial comparative advantage; relevance; growth quotient; location quotient