

# 近远程耦合视角下黄河流域产业虚拟水流动 与水资源短缺风险传递

石常峰<sup>1,2</sup>, 俞越<sup>1</sup>, 吴凤平<sup>2</sup>, 张陈俊<sup>3</sup>

(1. 河海大学商学院, 常州 213022; 2. 河海大学商学院规划与决策研究所, 南京 211100;

3. 江苏科技大学经济管理学院, 镇江 212100)

**摘要:** 为缓解水资源短缺这一黄河流域最大的矛盾, 基于虚拟水维度评估其水资源流动及其影响具有重要意义。运用多区域投入产出模型、结构路径分析方法和风险传递模型, 从多尺度近远程耦合视角分析黄河流域虚拟水流动和水资源短缺风险传递。结果表明: 在区域层面, 由黄河流域外部净调入虚拟水可以显著降低流域内部水资源短缺风险。在省际层面, 内蒙古、河南在流域内部发挥了较大的虚拟水支撑作用, 以四川、内蒙古为源头的省际虚拟水流动能有效缓解流域水资源短缺风险; 在部门层面, 经由农业部门流向工业、服务业部门, 以及能源、原材料部门流向建筑业部门的虚拟水占流域产业虚拟水流动路径的比例较大, 且水资源短缺风险传递价值较高。

**关键词:** 黄河流域; 多区域投入产出模型; 结构路径分析; 近远程; 虚拟水流动; 风险传递

黄河流域是中国重要的生态屏障、农业主产区、能源和基础工业基地<sup>[1]</sup>, 但同时也是典型的资源型缺水流域, 其人均水资源占有量 408 m<sup>3</sup>, 约为全国平均水平的 20%, 低于国际公认的人均 500 m<sup>3</sup> 的“极度缺水标准”。长期以来, 用水需求量大与水资源短缺之间的现实矛盾严重制约了黄河流域的经济社会发展<sup>[2]</sup>。中国政府高度重视黄河流域生态保护和高质量发展问题, 并强调要将水资源作为其最大的刚性约束, 落实“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”的“四水四定”原则, 推进黄河流域水资源节约集约化利用。2022 年颁布的《中华人民共和国黄河保护法》亦明确了黄河流域应当坚持节水优先、统筹兼顾、集约使用, 对水资源管理提出了更严格的要求。因此, 以水资源管理为抓手, 贯彻“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水方针, 缓解水资源供需矛盾, 进而探寻生态保护和高质量发展新路径已经成为黄河流域经济社会发展的战略导向。

2021 年发布的《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》多次提及“协同”, 并指出沿黄各省区仍存在着区域分工协作意识不强、高效协同发展机制不完善等问题。这对黄河流域治水节水提出了新的要求, 即不仅要因地制宜, 也要统筹兼顾, 从系统角度来研究黄河流域内部各地区之间水资源的耦合关系。“耦合”原本是指物理学中两个(或两个以上的)体系或运动形式通过各种相互作用而彼此影响的现象<sup>[3]</sup>, 后来也被经济学者

收稿日期: 2023-05-29; 修订日期: 2023-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(42271303); 教育部人文社会科学研究青年基金项目(22YJCZH232)

作者简介: 石常峰(1985-), 男, 江苏扬州人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为资源环境管理。

E-mail: 20161953@hhu.edu.cn

通讯作者: 吴凤平(1964-), 男, 江苏泰州人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为水资源管理与决策。

E-mail: wfp@hhu.edu.cn

用来反映城市化—生态环境、水—能—粮等复杂系统中的多要素交互作用<sup>[4-6]</sup>。系统内部交互作用(区内尺度)被定义为近程耦合关系,系统外部交互作用(区际尺度)则被定义为远程耦合关系<sup>[7]</sup>。延续这一思路,资源生态要素的近远程交叉耦合成为近年来的研究热点<sup>[8]</sup>。但当前关于区域水资源的研究很少明确区分近远程要素的作用与影响,从而未能形成对区域水资源的系统认识<sup>[9]</sup>。黄河流域是一个复杂地域系统,其内部划分上中下游,覆盖九个省区,地区发展既相互依赖又存在差异;同时还通过粮食、能源、化工、原材料等载体与流域外交互胁迫和交互促进<sup>[10,11]</sup>。因此,有必要运用近远程耦合视角,全面分析黄河流域内部与外部的水资源关联,深入剖析该区域水资源供需现状及矛盾。

由Allan<sup>[12]</sup>提出的“虚拟水”概念结合投入产出分析方法,可以将水资源作为一个虚拟属性附加在经济贸易活动中,从而更能反映出人类生产和消费活动对不同时空属性水资源的需求和影响,为缓解水资源供求矛盾提供了新思路<sup>[13]</sup>。当前,从不同的时空尺度上对中国的虚拟水流动进行测算和讨论已经取得了丰富的成果。其中,田旭等<sup>[14]</sup>、Wang等<sup>[15]</sup>、高向龙等<sup>[16]</sup>从中国省际、京津冀地区、黄河“几字弯”城市群等尺度各有侧重地对虚拟水流动特征开展了有益探讨。但是从宏观层面上开展的虚拟水流动研究,其重点往往局限于虚拟水的最初输出地区(部门)与最终输入地区(部门),从而不能明晰虚拟水在经济生产系统中的复杂迁徙转换。由Lenzen<sup>[17]</sup>提出的结构路径分析(SPA)可以将虚拟水流动在生产系统中层层分解为无穷多条生产链的流动量,已经成为识别关键用水生产链的一种行之有效的微观分析方法。例如Li等<sup>[18]</sup>利用SPA探究了中国粮食需求驱动的区域虚拟水流动路径,发现其中的关键路径与农业、化学工业等部门密切相关。另一项研究进一步表明,部分关键用水生产链的部门与最终需求分布在不同的省份,因此要加强区域间和部门间的水资源协同管理<sup>[19]</sup>。利用多区域投入产出分析与SPA结合的方法探究生产链层面上的虚拟水有向流动、中间路径特征、部门关联与差异更加符合近远程耦合视角的要求。因此,本文的研究重点之一即在对中国省域虚拟水进行测算的基础上,从近远程耦合视角出发考察黄河流域内部各地区间、内外部区域间虚拟水流动路径的方向及特征,由此评估区内关联与区际关联在黄河流域虚拟水流动中的地位及作用。

明晰黄河流域虚拟水流动特征后,进而考察这种流动给地区所带来的影响可为因地制宜的节水政策制定提供支撑。现有文献常采用水资源承载力、水资源压力指数等指标来表征区域水安全形势<sup>[20-22]</sup>。Feng等<sup>[23]</sup>的研究表明中国沿海发达地区消费活动依赖于北方缺水地区的水资源,从而严重加剧了北方水资源短缺。田贵良等<sup>[24]</sup>基于水资源承载力指标发现水资源紧张的上海通过净输入用水量极大地缓解了本地的水资源压力。上述研究初步表明,虚拟水流动能在一定程度上加剧输出地的水资源短缺,或缓解输入地的水资源压力。田欣等<sup>[25]</sup>进一步从稀缺水视角出发,量化分析了中国各地最终需求引起的水资源压力程度、压力转移方向及其变化趋势。但现有研究通常着眼区域本身受虚拟水流动的影响,忽视了虚拟水流动过程中对输入—输出地区双方所造成的相对影响,也缺乏对这种相对影响的有效刻画。为此,檀勤良等<sup>[26]</sup>结合区域水资源胁迫指数(WSI)与虚拟水流动关联系数构建了水资源综合风险指标,再将综合风险指标与省间净虚拟水流动结合以量化虚拟水流动过程中传递的风险。为了探索黄河流域水资源分配及水资源风险管理的有效途径,本文借鉴该思路,并进行了以下两个方面的优化:(1)基于投入产出分析将中间需求与最终需求区分开,明确了以最终消费为终端的虚拟水流动源汇双方;

(2) 将其与SPA方法结合进一步拓展至部门生产链层面的水资源短缺风险传递。

综上所述,本文基于近远程耦合视角,从区域和部门层面对黄河流域产业虚拟水流动和水资源短缺风险传递格局开展研究,为统筹黄河流域生态保护和高质量发展战略中的发展和安全两件大事<sup>[27]</sup>,提高应对水资源刚性约束的风险防范能力,更科学地调控黄河流域产业用水和优化贸易结构提供决策支撑。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 水资源多区域投入产出模型

对多区域投产表中的某一行来说,存在着如下平衡关系:

$$x_i^s = \sum_{t=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij}^{st} x_j^t + \sum_{t=1}^n y_i^{st} + e_i^s \quad (1)$$

式中:  $s$ 、 $t$ 表示区域;  $i$ 、 $j$ 表示部门;  $n$ 表示区域个数(个);  $m$ 表示单个区域的部门个数(个);  $x_i^s$ 表示区域 $s$ 的部门 $i$ 总产出;  $a_{ij}^{st}$ 表示直接消耗系数,表示区域 $t$ 的 $j$ 部门每生产单位产品需要消耗区域 $s$ 的部门 $i$ 的产品投入量;  $x_j^t$ 表示区域 $t$ 的部门 $j$ 总产出;  $y_i^{st}$ 表示区域 $t$ 最终需求对区域 $s$ 的部门 $i$ 的产品消费量;  $e_i^s$ 表示区域 $s$ 的部门 $i$ 的产品出口量。因此对整个投入产出表来说,存在如下矩阵关系:

$$X = AX + Y, X = (I - A)^{-1}Y \quad (2)$$

式中:  $X$ 为总产出矩阵;  $A$ 为直接消耗系数矩阵;  $Y$ 为最终需求矩阵,包括满足当地的最终需求和满足区域外的最终需求。将各区域的部门直接用水量引入,可表示为:

$$W = RX = R(I - A)^{-1}Y = RLY \quad (3)$$

式中:  $W$ 表示区域的部门直接用水矩阵;  $R$ 表示区域的部门用水强度;  $L$ 为里昂惕夫逆矩阵,又称为完全消耗矩阵。式(3)揭示了实体水被嵌入经济生产系统中转化为虚拟水的过程,这种过程起于部门生产且终止于最终需求。因而对虚拟水流动的考察将可以从左侧生产端和右侧消费端同时进行。区域 $s$ 流向区域 $t$ 的虚拟水量可由下式计算:

$$VW^{st} = \sum_u R^s L^{su} Y^{ut} \quad (4)$$

式中:  $VW^{st}$ 表示区域 $s$ 流向区域 $t$ 的虚拟水量;  $s$ 表示虚拟水流动的源地区;  $t$ 表示虚拟水流动的汇地区;  $u$ 表示中间生产地区。在本文中进行如下定义:若 $s=t$ ,则为定义为近程虚拟水流动。当 $s \neq t$ 时,若 $s$ 与 $t$ 处于流域内同一区域(上游、中游或下游),则为次近程虚拟水流动;若 $s$ 与 $t$ 分别处于流域内不同区域,则为次远程虚拟水流动;若 $t$ 处于流域外的其他国内区域,则为远程虚拟水流动(出口虚拟水流动将单独考虑)。

### 1.2 虚拟水结构路径分析

借助于完全消耗矩阵 $L$ 的虚拟水流动测算只能聚焦源汇双方,忽略了虚拟水流动过程中的复杂中间传导机制,包括区域节点与部门关联等。因此,应用SPA进一步对整体用水量进行分解:

$$\begin{aligned} W &= RLY = R(I - A)^{-1}Y \\ &= RIY + RAY + RA^2Y + RA^3Y + \dots \end{aligned} \quad (5)$$

当 $A$ 、 $A_2$ 、 $A_3 \dots$ 作为整体被考察时,可以揭示不同生产阶段的整体虚拟水流动;而当

$A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ …中的每个矩阵元素进一步被考察到时，无数条具体的部门虚拟水传导路径最终将会被揭示：

$$VW^{st} = R^s Y^t + R^s \sum_{u=1}^n A^{su} Y^{ut} + R^s \sum_{u=1}^n A^{su} \sum_{v=1}^n A^{uv} Y^{vt} + \dots \quad (6)$$

式中： $u$ 、 $v$ 表示中间生产区域。区别于上述区域虚拟水流动的近远程定义，在结构路径分析得到的虚拟水流动路径中，源、汇以及中间节点被同时考虑到：若所有节点相同（即处于同一省份），则为近程虚拟水路径；若节点不完全相同但处于流域内同一区域（上游、中游或下游），则为次近程虚拟水路径；若存在节点分别处于流域内不同区域，则称为次远程虚拟水路径；若存在节点处于流域外的其他国内区域，则为远程虚拟水路径（出口虚拟水路径同样单独考虑）。

### 1.3 水资源风险传递模型

基于MRIO方法和SPA方法可以对虚拟水流动实现量的考察，但这种流动还会显著影响源汇双方的区域水资源风险，即增加输出方水资源风险的同时降低输入方水资源风险。为了考察虚拟水流动带来的相对影响，本文参考檀勤良等<sup>[26]</sup>的思路构建水资源短缺综合风险指数 $WR$ ，用某地区或部门发生水资源短缺风险的可能性与发生风险后对其他地区或行业的影响波及程度的乘积来表示：

$$WR = WSI \times WCI \quad (7)$$

$$WSI = \frac{1}{1 + e^{-6.4WTA^*} \left( \frac{1}{0.01} - 1 \right)} \quad (8)$$

式中： $WSI$ 被广泛用来表示某地区用水压力，也可用来表示某地发生水资源短缺的可能性（取值范围介于0.01~1之间）<sup>[28]</sup>； $WCI$ 是基于拉斯姆森提出的影响力系数进行改造的虚拟水影响力系数<sup>[29]</sup>，表示某地区单位生产需求对其他省份所产生的用水需求波及程度； $WTA^*$ 表示变异因子修正的取水量与可用水量之比。

$$WCI^t = \frac{\sum_{s=1}^n R^s L^{st}}{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \sum_{s=1}^n R^s L^{st}} \quad (9)$$

$$wci_i^t = \frac{\sum_{s=1}^n \sum_{j=1}^m r^s l_{ij}^{st}}{\frac{1}{nm} \sum_{t=1}^n \sum_{s=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m r^s l_{ij}^{st}} \quad (10)$$

式中： $r$ 、 $l$ 分别表示部门层面的用水强度矩阵、里昂惕夫逆矩阵； $wci_i^t$ 表示地区 $t$ 的部门 $i$ 单位生产需求对其他所有部门产生的用水需求波及程度。为了量化虚拟水流动对源汇双方水资源风险造成的影响，本文从水资源输出地区和输入地区两个角度计算水资源传递过程中引发的实际风险量变化：

$$WRT_{source}^{st} = \frac{VW^{st} \times WR^s}{W^s} \quad (11)$$

$$WRT_{sink}^{st} = \frac{VW^{st} \times WR^t}{W^t}$$

式中： $WRT_{source}^{st}$ 表示水资源输出地区增加的风险量； $WRT_{sink}^{st}$ 则表示水资源输入地区减少



的风险量； $VW^s$ 表示区域 $s$ 流向区域 $t$ 的虚拟水量； $WR^s$ 和 $WR^t$ 分别表示区域 $s$ 和区域 $t$ 的水资源短缺综合风险指数； $W^s$ 和 $W^t$ 分别表示区域 $s$ 和区域 $t$ 的直接用水总量。最终，将虚拟水从区域 $s$ 流向区域 $t$ 的风险传递价值（ $V^{st}$ ）表示如下：

$$V^{st} = \frac{WRT_{sink}^{st}}{WRT_{source}^{st}} \quad (12)$$

在本文中，风险传递价值等于1时的虚拟水流动被定义为基准参照，此时水资源流动完全发生在区域内部或部门内部，从风险传递角度来看并不会对风险总量造成影响。风险传递价值大于1时的虚拟水流动或路径被定义为高效，因为这些流动有助于降低整体的水资源短缺风险；风险传递价值小于1时的虚拟水流动被定义为低效，因为这些流动反而会增加整体风险。

#### 1.4 数据来源及处理

黄河流域9省区的农业用水总量、工业用水总量和城镇公共用水量均直接取自各省2017年的《水资源公报》（鉴于河南和四川的城镇公共用水统计口径缺失，依据《第一次水利普查年鉴》披露的城镇公共用水占生活用水比例进行推算）。考虑到工业用水与城镇公共用水（建筑业+服务业用水总量）的水源差异，首先对于城镇公共用水总量，采用投入产出表中水生产与供应业对建筑业以及服务业各细分部门的投入占比进行分配。其次对于电力生产与供应业用水量，采用Jin等<sup>[30]</sup>于中国5408台发电机组的核算结果得到各省电力生产与供应业2017年用水量。最后对于除电力生产与供应部门之外的工业部门，基于2008年的《中国经济普查年鉴》《水资源公报》确定各部门的用水强度，再结合2017年工业各部门总产值以及实际用水总量进行调整获得。黄河流域外部的细分部门用水量由流域外各省按部门加总获得，处理步骤与上述基本一致。

2017年中国多区域投入产出表来源于中国碳核算数据库（CEADs），涵盖中国31个省级地区（不包含中国香港、澳门、台湾）和42个社会经济部门。为了使投入产出表与上述用水量核算的部门分类保持一致，将部门合并为39个（部门及地区编号见表1）。本文采用的省级水资源胁迫指数（ $WSI$ ）来源于Chai等<sup>[31]</sup>的研究成果。其中，黄河流域内部9个省份的 $WSI$ 可以直接获得，而外部整体 $WSI$ 则通过外部各省的 $WSI$ 与用水量数据反向推演再重新加总计算获得。首先通过外部各省份的 $WSI$ 和取水量（来源于《水资源公报》）计算出各省份的可用水量，再分别加总获得外部整体的取水总量和可用水总量，最后代入式（8）计算出外部整体 $WSI$ 。

## 2 结果分析

### 2.1 黄河流域虚拟水流动格局

#### 2.1.1 区域虚拟水近远程格局分析

流域整体层面，2017年黄河流域虚拟水流出总量为436.36亿 $m^3$ ，流入总量为441.52亿 $m^3$ ，总体呈现净流入状态。上中下游层面，流域上游呈现虚拟水净流出状态，而中游和下游则呈现流入状态。省级层面，虚拟水呈省际净流出的省份为四川、甘肃、宁夏、内蒙古，均分布在上游地区，而呈省际净流入的地区为青海、陕西、山西、河南和山东。其中，虚拟水流入量与流出量比值最低的是甘肃，仅为42.17%；最高的则是青海，达到178.92%。

表1 部门及省份编号信息  
Table 1 Numbering of departments and provinces

部门 编号	部门	部门 编号	部门	部门 编号	部门	地区 编号	地区
1	农林牧渔产品和服务业	14	金属冶炼和压延加工品业	27	交通运输、仓储和邮政业	1	青海
2	煤炭采选业	15	金属制品业	28	住宿和餐饮业	2	四川
3	石油和天然气开采业	16	通用设备业	29	信息传输、软件和信息 技术服务业	3	甘肃
4	金属矿采选业	17	专用设备业	30	金融业	4	宁夏
5	非金属矿和其他矿采选业	18	交通运输设备业	31	房地产业	5	内蒙古
6	食品和烟草业	19	电气机械和器材业	32	租赁和商务服务业	6	陕西
7	纺织业	20	通信设备、计算机和其 他电子设备业	33	科学研究和技术服务业	7	山西
8	纺织服装鞋帽皮革羽绒 及其制品业	21	仪器仪表业	34	水利、环境和公共设施 管理业	8	河南
9	木材加工品和家具业	22	其他制造业	35	居民服务、修理和其他 服务业	9	山东
10	造纸印刷和文教体育用品业	23	电力、热力的生产和供 应业	36	教育业	10	外部
11	石油、炼焦产品和核燃料 加工业	24	燃气、水的生产和供应业	37	卫生和社会工作	11	国外
12	化学工业	25	建筑业	38	文化、体育和娱乐业		
13	非金属矿物制品业	26	批发和零售业	39	公共管理、社会保障和 社会组织		

结合流动量和源汇两端来看（图1），与流域外部的流动关联占据黄河流域省际虚拟水流动格局的主要部分。向流域外部的虚拟水流出中，流域内的四川、内蒙古、河南、山东四省区具有较大的贡献，占黄河流域整体的69.88%。而在外部虚拟水流入中，四川、陕西、河南、山东占据了较大的输入量，达黄河流域整体的74.59%。在黄河流域内部的虚拟水省际流动中，内蒙古对流域内部发挥了最大的虚拟水支撑作用（23.48%），其次是河南（16.57%）；河南同时还是内部虚拟水输入占比最大的地区（32.43%）。

通过进一步区分黄河流域省际间的虚拟水近远程流动（表2），可以评估不同省份的水资源自给状况及其对省外用水的贡献程度。在各省份的虚拟水流动中，占比最高的是近程虚拟水流动，占比最低的是次近程虚拟水流动。自上游到下游，省区近程虚拟水占比呈现波动下降状态，其中最高的是青海（82.98%），最低的是陕西（42.79%）。次远程虚拟水流动占比超过10%的地区仅有内蒙古、陕西，表明这两个地区对其次远程地区用水具有较大贡献。此外，内蒙古、陕西、河南的近程虚拟水流动占比均低于50%，远程虚拟水流动占比均超过了30%，表明这三个地区对其远程地区的用水具有较大支撑作用。山东的出口虚拟水占比达到了18.28%，仅次于其近程虚拟水占比，表明其虚拟水流动结构相对侧重于出口。

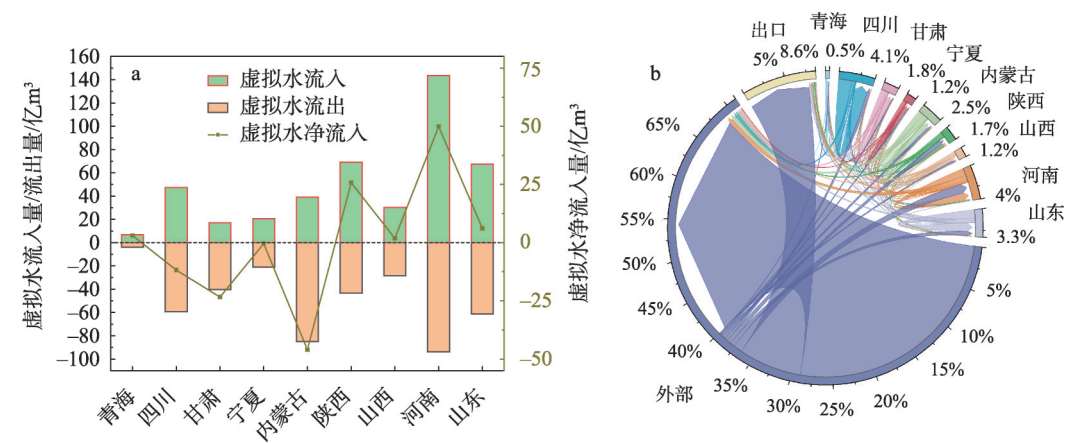


图1 黄河流域虚拟水流动区域格局

Fig. 1 Regional pattern of virtual water flow in the Yellow River Basin

表2 黄河流域省区虚拟水流动结构

Table 2 Virtual water flow structure of the provinces in the Yellow River Basin (%)

区域	流向流域内部			流向流域外部	
	近程	次近程	次远程	远程	出口
青海	82.98	1.38	2.11	10.24	3.29
四川	73.81	1.10	4.22	14.82	6.06
甘肃	61.84	2.46	8.72	21.94	5.04
宁夏	66.48	1.66	4.27	18.03	9.56
内蒙古	45.66	1.80	10.41	34.00	8.11
陕西	42.79	0.69	11.38	34.07	11.06
山西	53.53	1.38	6.21	29.31	9.58
河南	49.83	1.13	6.10	31.64	11.30
山东	64.01	1.87	2.08	13.76	18.28

2.1.2 部门虚拟水近远程格局分析

部门生产端用水的测算结果显示，农林牧渔业是黄河流域各省份最重要的生产用水部门，其次则是电力、热力的生产与供应业，四川、陕西、河南和山东的化学工业生产用水量同样占据较大比例（图2）。部门消费端用水的测算结果显示，农林牧渔业在消费端仍然是最为重要的用水部门，各省份第二产业中的食品和烟草业、建筑业，以及第三产业中的住宿和餐饮业同样消费了较大规模的水资源。此外，四川、山东、河南的卫生和社会工作业也占据较大比例的消费用水量。结合生产和消费端的用水量情况，农林牧渔业和化学工业部门通常是黄河流域省份的虚拟水净流出部门，更多地对其他部门发挥虚拟水支撑作用，而食品和烟草业、建筑业以及住宿和餐饮业则通常是虚拟水净流入部门。与其他省份不同的是，山西农林牧渔业的虚拟水流动特征反而表现为虚拟水净流入，这说明山西的第一产业倾向于从其他地区或部门调入大量虚拟水以应对自身水资源短缺问题。

黄河流域九省区的近程虚拟水流动路径显示（图3），部门1（农业）是绝大多数路

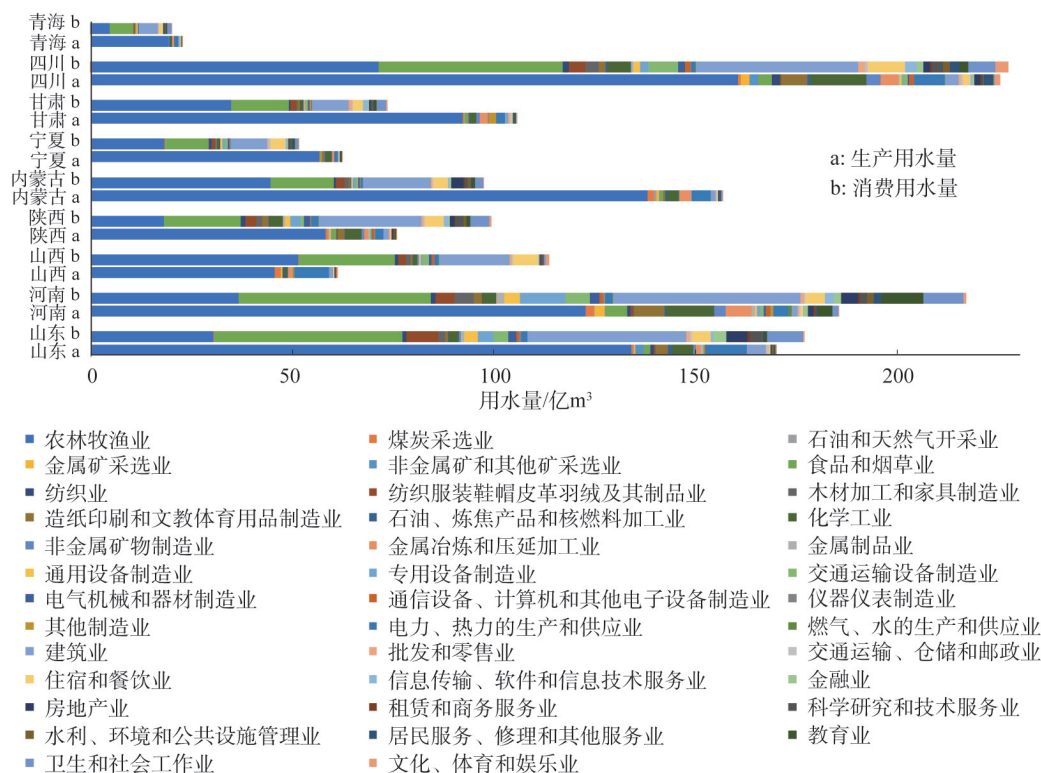


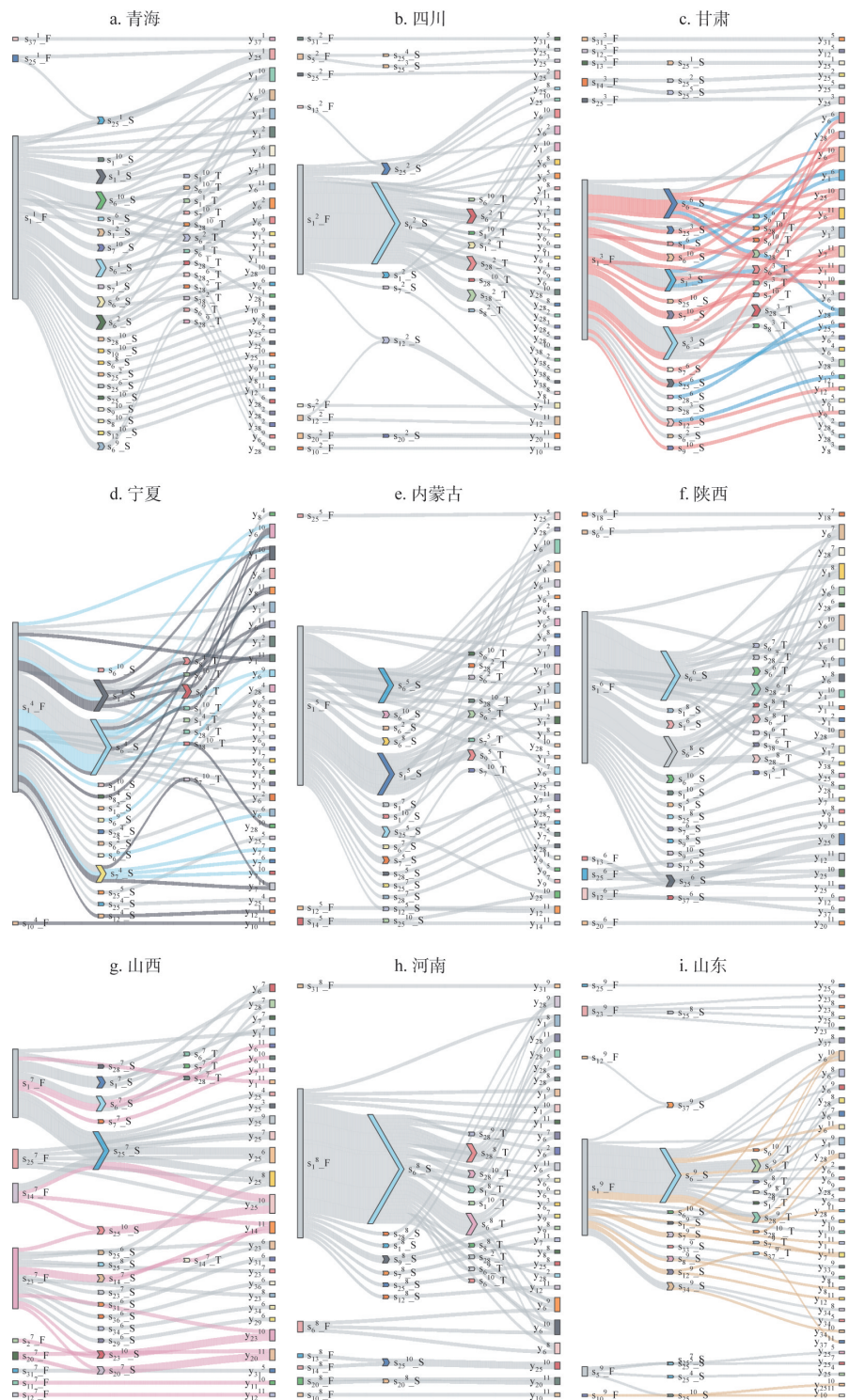
图2 国内贸易下黄河流域虚拟水流动部门格局

Fig. 2 Sectoral pattern of virtual water flow in the Yellow River Basin under domestic trade

径的关键源头用水部门。其结合部门6（食品和烟草业）、部门28（住宿餐饮业）形成的交叉路径，如路径“ $s_1 \rightarrow y_1$ ”“ $s_1 \rightarrow s_6 \rightarrow s_6$ ”“ $s_1 \rightarrow s_6 \rightarrow s_{28} \rightarrow y_{28}$ ”等占据关键虚拟水流动路径的主要部分。部门25（建筑业）相关路径，如路径“ $s_{25} \rightarrow y_{25}$ ”“ $s_1 \rightarrow s_{25} \rightarrow y_{25}$ ”也在近程路径中频次较高。各个省份的关键虚拟水流动路径还呈现一定的差异化特征。在四川和陕西的关键路径中，路径“ $s_{13} \rightarrow s_{25} \rightarrow y_{25}$ ”表明这两个省份的建筑业节水还需要考虑部门13（非金属矿物制造业）的用水效率改进。青海、陕西的路径“ $s_{37} \rightarrow y_{37}$ ”“ $s_{12} \rightarrow s_{37} \rightarrow y_{37}$ ”表明部门37（教育业）以及为其提供原材料的部门12（化学工业）同样需要获得节水关注。内蒙古、山西、河南的路径“ $s_1 \rightarrow s_1 \rightarrow s_7 \rightarrow y_7$ ”“ $s_1 \rightarrow s_1 \rightarrow s_9 \rightarrow y_9$ ”表明部门7（纺织业）、部门9（木材加工和家具业）作为农业的终端部门在节水工作中作用同样不能被忽视。山西和山东的路径“ $s_{23} \rightarrow y_{23}$ ”表明这两个省份的部门23（电力、热力生产与供应业）需要提升能源生产与供应过程中的用水效率。对于山东，两条差异化路径“ $s_1 \rightarrow s_8 \rightarrow y_8$ ”“ $s_1 \rightarrow s_{33} \rightarrow y_{33}$ ”表明部门8（纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品业）、部门33（科学研究和技术服务业）引致的农业用水需求需要被考虑。

次近程路径显示，农业及其相关部门（部门6、部门28和部门38）仍然是关键虚拟水流动路径中重要节点。上游地区的路径“ $s_1^1 \rightarrow s_6^2 \rightarrow s_{38}^2 \rightarrow y_{38}^{2*}$ ”“ $s_1^2 \rightarrow s_6^2 \rightarrow s_{38}^2 \rightarrow y_{38}^{5*}$ ”表明四川和内蒙古的部门38（文化、体育和娱乐业）是上游次近程路径的重要终端。中游的陕西主要通过农业相关路径在虚拟水流动中支持山西，而山西主要通过基于部门23的虚拟水路径（如路径“ $s_{23}^7 \rightarrow y_{23}^{6*}$ ”“ $s_{23}^7 \rightarrow s_{25}^6 \rightarrow y_{25}^{6*}$ ”“ $s_{23}^7 \rightarrow s_{36}^6 \rightarrow y_{36}^{6*}$ ”等）支持陕西的能源用水





注:  $s$ 表示部门,  $y$ 表示最终消费,  $_F$ 、 $_S$ 、 $_T$ 分别表示路径中的第一生产阶段、第二生产阶段、第三生产阶段。考虑到数值跨度较大及可视化效果,将不同路径设置为等同宽度。

图3 黄河流域各省区关键虚拟水流动路径

Fig. 3 Key virtual water flow paths in the provinces in the Yellow River Basin

需求。下游的河南、山东主要是在农业相关路径上进行了较大规模的虚拟水次近程交换。九个省份的次远程路径总体上与次近程路径的部门结构较为相似。不同之处主要体现在: 山西向次远程地区的虚拟水流动主要是基于部门25(如路径“ $s_{25}^7 \rightarrow y_{25}^8$ ”“ $s_{23}^7 \rightarrow s_{25}^8 \rightarrow y_{25}^8$ ”“ $s_1^7 \rightarrow s_{25}^7 \rightarrow y_{25}^9$ ”等)实现的, 山东虚拟水还会通过路径“ $s_5 \rightarrow s_{25} \rightarrow y_{25}$ ”流向宁夏、内蒙古、山西的建筑业部门。因此在流域次远程水资源管理中需要额外注意山西和山东的差异化关键路径。

远程路径显示, 农业、建筑业两类关键路径仍然占据重要地位。国内其他地区向黄河流域内部的虚拟水流动路径, 同样集中于农业、建筑业两个类别, 这表明黄河流域以农业、建筑业为载体与国内其他地区之间保持着交错复杂的虚拟水交换关系。黄河流域内部各省的出口路径结构与国内路径相差较大。从虚拟水出口路径的区域结构来看, 四川、山西、山东的路径主要通过当地生产加工直接供给国外消费, 青海、宁夏、内蒙古、河南的部分路径会经由流域外部地区的加工环节再出口到国外消费, 甘肃、陕西的部分出口路径还要流经流域内地区的中间加工环节。从虚拟水出口路径的部门特征来看, 以农业为路径源头部门, 以部门6~部门9、部门12等为路径终端部门的出口路径占据非常重要的地位。

## 2.2 黄河流域水资源风险传递

### 2.2.1 区域水资源风险传递分析

由于各省区面临的水资源压力不同, 且在虚拟水网络中所处地位也不同, 所以虚拟水流动关联导致的风险收益与风险成本通常存在较大差异。本文进一步从输出方增加的风险和输入方减少的风险两方面考察了黄河流域虚拟水流动风险传递价值。在区域虚拟水交换中, 甘肃、内蒙古和外部区域增加了虚拟水短缺风险, 对当地产生了不利影响。而流域内其他7个省区则利用省际贸易减少了当地的虚拟水短缺风险。其中, 区域风险增加量与风险减少量比值较大的是山东(223.5%)、青海(221.75%), 比值较低的是甘肃(48.59%)和内蒙古(54.12%)。

如图3所示, 甘肃通过虚拟水流出增加的风险量是最大的, 风险量增加最少的则是四川。黄河流域内部九省份增加的风险量大部分来自向外部输出的虚拟水, 其中占比最低的是甘肃(66.25%), 占比最高的是河南(81.4%)。此外, 各地区向河南、陕西、四川流动的虚拟水也在较大程度上增加了当地水资源短缺风险。通过调入省外虚拟水, 宁夏减少的风险量是最多的, 而四川减少的风险量是最少的。黄河流域内部九省份减少的风险量大部分来自外部输入的虚拟水, 其中占比最低的是山西(73.55%), 占比最高的是四川(85.61%)。对外部地区来说, 四川、内蒙古、河南向其输出的虚拟水在较大程度上减少了外部水资源短缺风险。

依托虚拟水流动的风险传递对源汇双方来说是非对称的, 本文基于风险传递价值来衡量这种非对称传递的效用(图4)。首先观察流域内外部的虚拟水流动, 风险传递价值最高的是外部虚拟水向青海的流动(175.94), 对应青海虚拟水流向外部的风险传递价值为最低( $5.68 \times 10^{-3}$ )。总的来看, 黄河流域外部向流域内部的虚拟水流动具备较高风险传递价值的, 最低的是外部向四川的虚拟水流动(1.33)。这表明黄河流域各个省份都应当将产业结构与贸易结构朝着有助于远程虚拟水净流入的方向转变。

在黄河流域内部, 青海的省外虚拟水流入始终表现为高于1的风险传递价值, 这表

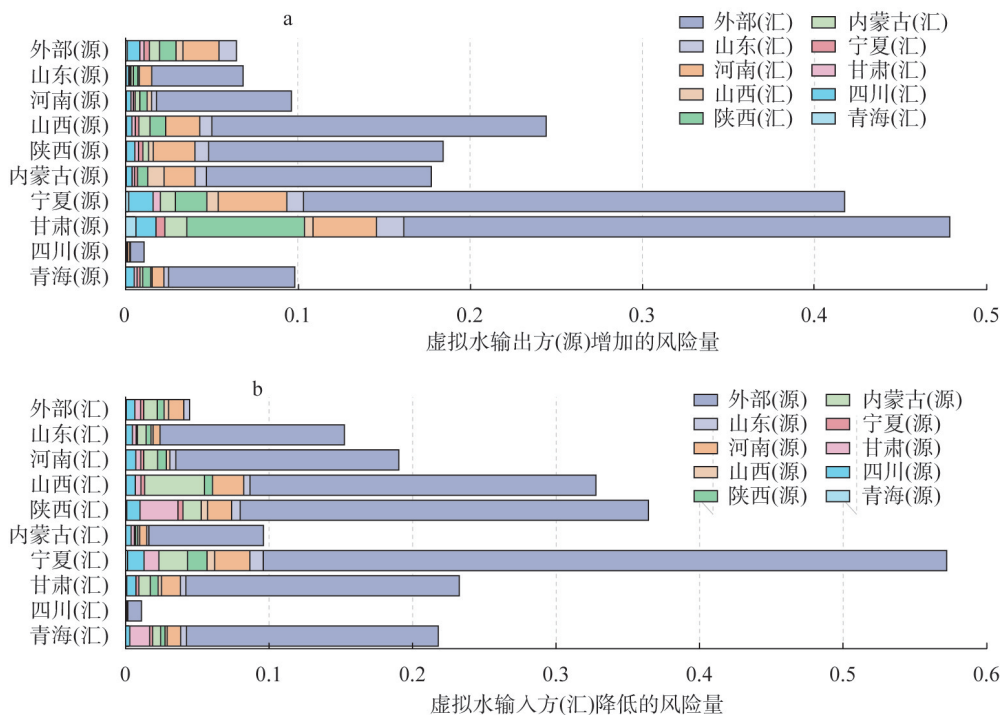


图4 虚拟水流动对源汇双方风险量的影响

Fig. 4 Impact of virtual water flows on the risk of both source and sink

明青海应当积极增加省外虚拟水流入,并减少自身的虚拟水流出,以缓解当地较高的水资源短缺风险。四川虚拟水的风险传递价值仅在流向流域外部时较低,在流向流域内部其他省份时的风险传递价值均远高于1,因此宜鼓励四川在更大规模上向流域内其他省份输出虚拟水。从风险传递价值最大化的角度,内蒙古应当将其虚拟水流动方向调整为四川、河南、山东以外的其他省份。对中游地区来说,陕西向山西虚拟水流动的风险传递价值较高。而对于下游的河南与山东,应当着重考虑通过贸易活动向上游的青海、甘肃、宁夏和中游的山西输出虚拟水。就下游地区自身而言,河南向山东虚拟水流动的风险传递价值较高(1.7)。

### 2.2.2 部门水资源风险传递分析

通过计算每条关键虚拟水流动路径的输出方风险增加量与输入方风险减少量,可以进一步揭示这种微观产业层面的风险传递价值(图5)。在近程虚拟水流动中,仅在陕西出现了一

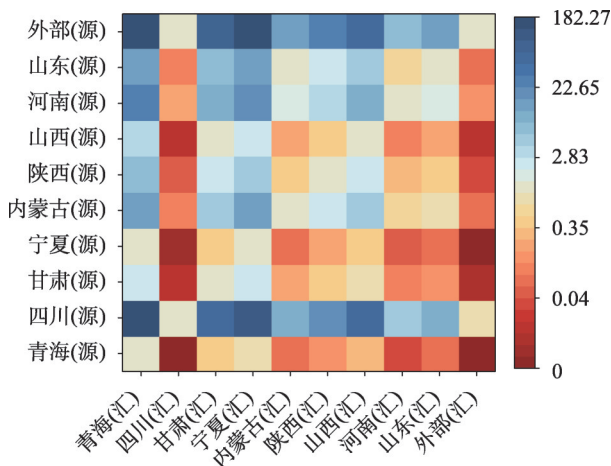


图5 黄河流域省际虚拟水流动风险价值矩阵  
Fig. 5 Risk value of inter-provincial virtual water flow in the Yellow River Basin



条风险传递价值为0.79的低效路径“ $s_{13}^6 \rightarrow s_{25}^6 \rightarrow y_{25}^6$ ”。多数近程路径仅表现为部门内部虚拟水循环（风险传递价值为1），而其余近程路径往往具备较高风险传递价值。总体来说，黄河流域不同部门之间的近程虚拟水流动有助于缓解当地水资源短缺风险。

上游地区中，四川的10条关键次近程路径均为高效路径，其中风险传递价值最高的路径是“ $s_1^2 \rightarrow s_6^2 \rightarrow s_{38}^2 \rightarrow y_{38}^5$ ”（59113.79），最低的是“ $s_5^2 \rightarrow s_{25}^3 \rightarrow y_{25}^3$ ”（83.58）。上游地区其他四省份的关键虚拟水流动路径中都存在低效路径。内蒙古地区既存在风险传递价值高达2701.24的高效路径“ $s_1^5 \rightarrow s_6^5 \rightarrow y_6^4$ ”，也存在价值仅为0.12的低效路径“ $s_1^5 \rightarrow y_1^2$ ”。相较于四川和内蒙古，青海、甘肃、宁夏三地区并没有特别高效的次近程路径，其路径风险传递价值相对较低。而在中游地区，陕西流向山西方向的虚拟水流动路径的风险传递价值普遍高于其逆向流动，这可能是由两者次近程路径的部门特征决定的，即陕西主要通过农业实现对山西的虚拟水支撑，而山西主要通过能源部门向陕西输出虚拟水。不同于上中游地区次近程路径的普遍低效，下游的河南、山东之间的20条次近程路径均是高效路径，形成了协同高效的风险转移模式。其中，河南流向山东的最高效路径是“ $s_1^8 \rightarrow s_6^8 \rightarrow s_{28}^9 \rightarrow y_{38}^9$ ”（900.71），而山东流向河南的最高效路径是“ $s_1^9 \rightarrow s_{34}^9 \rightarrow y_{34}^8$ ”（1326.16）。

上游地区的次远程路径风险传递特征与其次近程路径较为相似。青海、甘肃、宁夏三地区的关键次远程路径中同样存在较多的低效传递路径。四川流向中下游地区的虚拟水路径中存在着大量的高效路径，其中路径“ $s_1^2 \rightarrow s_6^2 \rightarrow y_6^7$ ”的风险传递价值高达14465.15。内蒙古次远程关键路径中风险传递价值最高的是“ $s_1^5 \rightarrow s_1^5 \rightarrow s_9^5 \rightarrow y_9^7$ ”（110028.51），低效路径仅有一条“ $s_1^5 \rightarrow y_1^8$ ”（0.8）。而中游地区的陕西、山西均存在着较多的次远程低效路径。值得关注的是山西流向宁夏的路径“ $s_1^7 \rightarrow s_{25}^7 \rightarrow y_{25}^4$ ”，其风险传递价值达到了1161.75。下游的河南对上中游地区的水资源短缺风险贡献较大，例如路径“ $s_1^8 \rightarrow s_9^8 \rightarrow y_9^7$ ”的风险传递价值达到了138393.78。山东同样对次远程地区的水资源短缺风险缓解发挥了一定的虚拟水支持作用。

在远程虚拟水流动中，黄河流域内部地区的远程虚拟水流动路径普遍具有较低的风险传递价值，再次显示出黄河流域整体相较于流域外部的较高水资源综合短缺风险。其中青海均为低效远程路径，宁夏仅有1条风险传递价值仅有1.15的高效远程路径，四川也存在3条低效远程路径，甘肃的远程路径绝大多数都是风险传递价值聚集在1~2之间的高效路径，中下游四个省份同样存在较多的低效路径。与之相反，流域外部流向内部地区的路径大多具有较高的风险传递价值。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

本文基于多尺度近远程耦合视角考察了黄河流域区域、部门层面的虚拟水流动特征，并结合虚拟水流动量和水资源短缺风险指数进一步分析了黄河流域的水资源短缺风险传递格局。结果表明：

（1）黄河流域虚拟水流动空间格局显示，在黄河流域与其外部的虚拟水交换中四川、河南、山东三省占据了相对重要的地位。仅有甘肃和内蒙古在与黄河流域外部的水资源交互流动中表现为向流域外部的虚拟水净流出，这表明其他7个省份均通过消费活



动从流域外部净调入了虚拟水。而流域内部省际虚拟水流动特征表明,内蒙古的生产活动对流域内部发挥了最大的虚拟水支撑作用,河南的消费需求则导致其成为流域内最大的虚拟水调入地区。从近远程耦合视角来看,各省份近程虚拟水流动占比最高,其次是远程虚拟水流动(山东的出口虚拟水流动规模则要大于远程虚拟水流动);次近程虚拟水流动占比最低。

(2) 聚焦虚拟水流动产业层面,关键虚拟水流动路径的重点部门是农林牧渔业和建筑业。其中,农业通常作为路径的源头部门,发挥虚拟水输出作用。因此在考虑不同路径差异性的同时,尤其要关注农业部门与部门6、部门28、部门38等路径终端部门节水的协同性。而建筑业多作为虚拟水流动路径的终端部门,相关节水措施的着力点需要聚焦建筑业与部门1、部门5、部门23等路径源头部门的交互协同。此外,对能源大省山西,以电力、热力的生产和供应业为源头的省际虚拟水流动路径亦需要得到重点关注。总体而言,农业的生产活动以及建筑业的消费活动引致的虚拟水流动路径会对产业虚拟水流动产生重要影响。

(3) 区域水资源风险传递的结果表明,国内贸易增加了流域外部的整体水资源短缺风险,缓解了流域内部的整体水资源短缺风险,并且流域外部增加的水资源短缺风险要远小于流域内部降低的水资源短缺风险,这表明流域外部虚拟水流向流域内部的过程是高效的,有助于降低整体风险水平。在流域内部层面,甘肃、内蒙古的水资源短缺风险是增加的,而流域内其他7个省份的水资源短缺风险是降低的。其中,四川虚拟水在流域内部的流动具备较高的风险传递价值,下游河南、山东的虚拟水向上游(除四川外)、中游地区的流动也较为高效。流域内其他地区虚拟水省际流动的风险传递价值相对较低。这表明通过虚拟水流动,四川、河南、山东三省生产活动对降低流域内水资源短缺风险发挥了重要作用。

(4) 将虚拟水流动路径置于部门风险传递层面,发现近程虚拟水流动路径多有利于降低流域水资源短缺风险(仅陕西存在一条低效路径)。在次近程与次远程虚拟水流动路径中,以四川、内蒙古为源头的路径风险传递价值相对较高,而以青海、甘肃、宁夏等地区为源头的路径风险传递价值较低。外部虚拟水流向流域内部的路径普遍具有较高的风险传递价值。部门间投入产出关联表明,农业虚拟水流向工业、服务业部门往往伴随较高的风险传递价值。以流域内各地区建筑业为终端部门的虚拟水流动路径多具备较高的风险传递价值,而流向流域外建筑业的虚拟水路径的风险传递价值则相对偏低。对山西以电力、热力的生产和供应业为源头的虚拟水流动路径来说,其流向流域内部往往要比流向流域外部具备更高的风险传递价值。

### 3.2 讨论

中国对黄河流域水资源管理工作中的风险防范给予了充分关注。基于系统性流域水资源短缺风险管理原则,黄河流域需从外部调入虚拟水以缓解内部风险。然而在流域内外部的虚拟水交换过程中,甘肃和内蒙古却呈现虚拟水净输出,这反而加剧两地的水资源短缺风险。在流域内部的虚拟水交换中,下游的河南、山东表现为虚拟水净流入。然而根据风险传递价值矩阵,两省更被期望向流域内其他省份净输出虚拟水,以降低流域整体水资源短缺风险。中游的山西、陕西应当向上游地区(除四川以外)输出虚拟水,并从下游地区调入虚拟水。但两者虚拟水净流动的现实方向则恰好相反,需要引

起重视。上游的青海向流域内其他省份输出虚拟水的过程缺乏风险传递价值, 而其虚拟水净流动也呈现净流入状态, 降低了当地的水资源短缺风险。由于同样具备较高的风险水平, 甘肃和宁夏可以在当地推广青海从其他地区净调入虚拟水的贸易模式。内蒙古则应当大力发展从四川、河南、山东净调入虚拟水的省际贸易。四川对于中游和下游地区的虚拟水支撑作用较大, 向流域内其他省份输出虚拟水的风险传递价值较高, 有效缓解了流域整体风险。通过以上对黄河流域虚拟水流动特征以及风险传递特征的揭示, 本文为黄河流域水资源优化配置提出以下政策建议:

(1) 为贯彻党中央“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水方针, 首先黄河流域各地区需要持续推进节水技术发展, 流域上游地区如甘肃、内蒙古尤其需要从生产端出发降低部门用水强度。例如进一步优化农业种植结构, 发展节水型农业; 降低建筑业部门对耗水原材料的依赖; 电力生产与供应业部门可以使用可再生水进行冷却以实现节水目的。从产业层面开发以农业、建筑业为支撑的高附加值节水型产业, 如发展特色旅游业也是值得考虑的方向。其次, 积极探索产业链节水机制, 实现水资源节约协同管理。例如农业部门需要统筹与部门6、部门28、部门38等中间与终端部门的节水工作, 以实现农产品生产、加工、销售全环节的用水效率提升; 对于建筑业部门, 则需要重点关注部门5、部门12、部门13等原材料供应部门的协同节水潜力。最后, 政府也应在推行扩大内需战略的同时引导消费结构升级。鼓励补贴节水产品的生产与销售, 提升居民节水意识与消费习惯。

(2) 为缓解水资源短缺这一黄河流域最大矛盾, 需在“以水四定”原则的引导下优化产业布局并转变贸易结构, 以降低黄河流域整体水资源短缺风险。首先, 推动黄河流域内部积极扩大从流域外部的进口规模, 尤其是水资源密集型产品, 并且节水技术和知识的转移在贸易过程中也应当是强制性, 以帮助黄河流域省份降低生产用水强度。其次在流域内部, 鉴于四川较低的水资源综合风险, 应适当扩大四川的省际贸易规模, 发挥其对黄河流域上中下游地区的虚拟水支撑作用。内蒙古在发挥农业虚拟水支撑作用的同时, 应当积极探索从四川、河南、山东三省进口其他水密集型产品的贸易模式, 以实现流域内部水资源短缺风险的优化配置。最后, 一方面是要促进现有关键虚拟水流动路径的用水效率提升, 另一方面也要推动黄河流域各地区逐渐摒弃风险传递价值较低的虚拟水流动路径, 转而鼓励风险传递价值较高的虚拟水流动路径发展。比如路径“ $s_1^2 \rightarrow s_6^2 \rightarrow s_{38}^2 \rightarrow y_{38}^5$ ”“ $s_1^{10} \rightarrow s_6^{10} \rightarrow s_{38}^{10} \rightarrow y_{38}^8$ ”都具备较高的风险传递价值, 有助于发挥四川和流域外部地区的水资源相对优势。此外, 针对黄河流域省际贸易下形成的虚拟水流动与水资源风险传递格局, 考虑地区水资源短缺压力的水权交易价格或许会是平衡区域水资源短缺风险的有效手段。

与结果相关的局限性主要来自数据不确定性。首先, 多源数据整合过程中的适配性问题导致本文未能进一步开展水资源短缺风险传递的时序分析; 其次, 在统计数据缺失的情况下, 本文虽可参考现有研究方法、数据成果进行细部门用水量测算, 但仍然可能与部门现实用水情况存在一定偏差。部门用水量测算方法的改进, 官方统计数据的获得以及连续年份的数据分析将会得到更加精准的研究结果。风险分析是水资源管理的一个重要视角, 综合考虑区域水资源短缺风险、产业结构、技术水平等因素以更加科学地优化区域间虚拟水流动结构也将会是进一步研究的方向。

## 参考文献(References):

- [1] 贾绍凤, 梁媛. 新形势下黄河流域水资源配置战略调整研究. 资源科学, 2020, 42(1): 29-36. [JIA S F, LIANG Y. Suggestions for strategic allocation of the Yellow River water resources under the new situation. Resources Science, 2020, 42(1): 29-36.]
- [2] 茹少峰, 马茹慧. 黄河流域生态环境脆弱性评价、空间分析及预测. 自然资源学报, 2022, 37(7): 1722-1734. [RU S F, MA R H. Evaluation, spatial analysis and prediction of ecological environment vulnerability of Yellow River Basin. Journal of Natural Resources, 2022, 37(7): 1722-1734.]
- [3] 黄金川, 方创琳. 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析. 地理研究, 2003, 22(2): 211-220. [HUANG J C, FANG C L. Analysis of coupling mechanism and rules between urbanization and eco-environment. Geographical Research, 2003, 22(2): 211-220.]
- [4] FENG C, TANG X, JIN Y, et al. Regional energy-water nexus based on structural path betweenness: A case study of Shanxi province, China. Energy Policy, 2019, 127: 102-112.
- [5] 马恩朴, 蔡建明, 郭华, 等. 城市化背景下食物系统耦合研究的理论框架及优先方向. 地理学报, 2021, 76(10): 2343-2359. [MA E P, CAI J M, GUO H, et al. Theoretical framework and research priorities on food system couplings in an urbanization context. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(10): 2343-2359.]
- [6] 叶玮怡, 马恩朴, 廖柳文, 等. 远程耦合视角下国际大豆贸易网络的时空演化及影响因素. 自然资源学报, 2023, 38(6): 1632-1650. [YE W Y, MA E P, LIAO L W, et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of international soybean trade network from a telecoupling perspective. Journal of Natural Resources, 2023, 38(6): 1632-1650.]
- [7] 方创琳, 任宇飞. 京津冀城市群地区城镇化与生态环境近远程耦合能值代谢效率及环境压力分析. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(7): 833-846. [FANG C L, REN Y F. Analysis of emergy-based metabolic efficiency and environmental pressure on the local coupling and telecoupling between urbanization and the eco-environment in the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration. Scientia Sinica: Terrae, 2017, 47(7): 833-846.]
- [8] 马恩朴, 叶玮怡, 廖柳文, 等. 城市食物系统演化的人地耦合启示及驱动力: 以北京食物系统为例. 自然资源学报, 2022, 37(10): 2617-2635. [MA E P, YE W Y, LIAO L W, et al. Human-land coupling enlightenment and driving forces of urban food system evolution: A case study of Beijing food system. Journal of Natural Resources, 2022, 37(10): 2617-2635.]
- [9] 孙思奥, 郑翔益, 刘海猛. 京津冀城市群虚拟水贸易的近远程分析. 地理学报, 2019, 74(12): 2631-2645. [SUN S A, ZHENG X Y, LIU H M. Local and distant virtual water trades in Beijing-Tianjin-Hebei Region. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(12): 2631-2645.]
- [10] CHENG L, TIAN J, XU H, et al. Unveiling the nexus profile of embodied water-energy-carbon-value flows of the Yellow River Basin in China. Environmental Science & Technology, 2023, 57(23): 8568-8577.
- [11] XIE P, ZHUO L, YANG X, et al. Spatial-temporal variations in blue and green water resources, water footprints and water scarcities in a large river basin: A case for the Yellow River Basin. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125222, Doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125222.
- [12] ALLAN T. Fortunately there are substitutes for water-otherwise our hydropolitical futures would-be impossible. Proceedings of the Conference on Priorities for Water Resources Allocation and Management: Natural Resources and Engineering Advisers Conference. London: Overseas Development Inst, 1993: 13-26.
- [13] 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. 水利学报, 2020, 51(9): 1059-1069. [ZHUO L, LI M, WU P T, et al. Assessment of crop related physical-virtual water coupling flows and driving forces in Yellow River Basin. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(9): 1059-1069.]
- [14] 田旭, 耿涌, 吴瑞, 等. 中国区域水足迹及虚拟水贸易的时空演化路径. 环境经济研究, 2021, 6(4): 85-101. [TIAN X, GENG Y, WU R, et al. Spatial-temporal evolutionary path of regional water footprint and virtual water trade in China. Journal of Environmental Economics, 2021, 6(4): 85-101.]
- [15] WANG S, CHEN B. Unraveling energy-water nexus paths in urban agglomeration: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei. Applied Energy, 2021, 304: 117924, Doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117924.
- [16] 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研究. 生态学报, 2022,

- 42(24): 1-14. [GAO X L, SHI H, DANG X H. Characteristics of water use in the "Jiziwan" urban agglomeration of the Yellow River Watershed and key areas of water-saving based on input and output model. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(24): 1-14.]
- [17] LENZEN M. Structural path analysis of ecosystem networks. *Ecological Modelling*, 2007, 200(3-4): 334-342.
- [18] LI K, LIANG S, LIANG Y, et al. Mapping spatial supply chain paths for embodied water flows driven by food demand in China. *Science of the Total Environment*, 2021, 786: 147480, Doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147480.
- [19] LI K, FENG C, LIANG Y, et al. Critical transmission sectors for provincial food-water nexus in China. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 279: 123886, Doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123886.
- [20] BERTASSELLO L, MÜLLER M F, WIECHMAN A, et al. Food demand displaced by global refugee migration influences water use in already water stressed countries. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 2706, Doi: 10.1038/s41467-023-38117-0.
- [21] 张中浩, 孙诗萌, 高峻. 长三角城市群水—能源—粮食系统压力的演变特征及其影响机制. *自然资源学报*, 2022, 37(6): 1586-1597. [ZHANG Z H, SUN S M, GAO J. Evolution characteristic and influencing mechanism of water-energy-food stress in Yangtze River Delta Urban Agglomeration. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(6): 1586-1597.]
- [22] 李涛, 曹卫东, 王雪妍. 长三角一体化下城市规模提升的水环境风险: 以合肥市为例. *自然资源学报*, 2023, 38(5): 1366-1377. [LI T, CAO W D, WANG X Y. Study on water environment risk of city size increase under the integration of Yangtze River Delta: A case study of Hefei city. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(5): 1366-1377.]
- [23] FENG K, HUBACEK K, PFISTER S, et al. Virtual scarce water in China. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(14): 7704-7713.
- [24] 田贵良, 李娇娇, 李乐乐. 基于多区域投入产出模型的长江经济带虚拟水流动格局研究. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(3): 81-88. [TIAN G L, LI J J, LI L L. Pattern of virtual water flow in the Yangtze River Economic Belt based on multi-regional input-output model. *China Population, Resources and Environment*, 2019, 29(3): 81-88.]
- [25] 田欣, 熊翌灵, 刘尚炜, 等. 中国省际水资源压力的转移模式. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(12): 75-83. [TIAN X, XIONG Y L, LIU S W, et al. Deciphering the pattern for inter-provincial water stress transferring: A case study on China's mainland. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(12): 75-83.]
- [26] 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. *中国软科学*, 2021, (6): 144-152. [TAN Q L, HAN J, LIU Y. Correlation analysis and risk transfer of provincial virtual water flow based on input-output model. *China Soft Science*, 2021, (6): 144-152.]
- [27] 习近平. 在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话. *求是*, 2019, (20): 4-11. [XI J P. Speech at the symposium on ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin. *Qiushi*, 2019, (20): 4-11.]
- [28] PFISTER S, KOEHLER A, HELLWEG S. Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(11): 4098-4104.
- [29] GUITTON H, RASMUSSEN P N. Studies in inter-sectoral relations. *Revue Économique*, 1957, 8(6): 1103, Doi: 10.2307/3498675.
- [30] JIN Y, BEHRENS P, TUKKER A, et al. The energy-water nexus of China's interprovincial and seasonal electric power transmission. *Applied Energy*, 2021, 286: 116493, Doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116493.
- [31] CHAI L, LIAO X, YANG L, et al. Assessing life cycle water use and pollution of coal-fired power generation in China using input-output analysis. *Applied Energy*, 2018, 231: 951-958.



## Exploring virtual water flows and water resources risk transfer in the Yellow River Basin based on local-distant perspective

SHI Chang-feng<sup>1,2</sup>, YU Yue<sup>1</sup>, WU Feng-ping<sup>2</sup>, ZHANG Chen-jun<sup>3</sup>

(1. Business School, Hohai University, Changzhou 213022, Jiangsu, China; 2. Business School, Institute of Planning and Decision-Making, Hohai University, Nanjing 211100, China; 3. School of Economics and Management, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, Jiangsu, China)

**Abstract:** Water resources are the biggest rigid constraint facing the Yellow River Basin, and the proposed virtual water concept provides an effective way to optimize the regional allocation of water resources based on value flow. To implement the major national strategy of ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin, it is important to scientifically assess the basin virtual water flow pattern and its impact. Based on the 2017 input-output table and sectoral water use data of each province in China, this study applied the environmentally extended multiregional input-output model and structural path analysis to portray the virtual water flow pattern at the regional and sectoral levels in the Yellow River Basin from a local-distant perspective, and further examined the water risk transfer due to virtual water flow in conjunction with the water risk transfer model. The results indicated that: (1) At the regional level, the risk transfer value of virtual water flows from outside the basin to inside the basin was relatively high. Therefore, the Yellow River Basin significantly reduced its own water shortage risk by net transferring virtual water from the outside. (2) At the provincial level, the proportion of local virtual water was the highest and the proportion of sub-local virtual water was the lowest in each province. Inner Mongolia and Henan were more supportive of virtual water flows within and outside the basin. The proximal virtual water flow path mitigated the risk of localized water shortage. The sub-local and sub-distant virtual water flow paths with Sichuan and Inner Mongolia as sources had high risk-transfer values. (3) At the sectoral level, the key sectors for important virtual water flow paths were agriculture and construction. Among them, agriculture usually served as the source sector of the pathway, while construction mostly served as the terminal sector of the pathway. Virtual water flows from agriculture to industry and services tended to result in higher risk-transfer values. Virtual water flow pathways with construction as the terminal sector in the watershed also had a high risk-transfer value. Therefore, effective ways to promote water conservation and reduce the risk of water shortage in the Yellow River Basin through cross-regional and cross-sectoral coordination and optimal allocation of water resources should be actively explored.

**Keywords:** Yellow River Basin; multiregional input-output model; structural path analysis; local and distant view; virtual water flows; risk transfer