

引用格式: 项潇智, 张雅娴. 中国行业间水-能源-食物投入产出关联特征[J]. 资源科学, 2022, 44(3): 595-607. [Xiang X Z, Zhang Y X. The characteristics of the water-energy-food input-output nexus among China's national industries[J]. Resources Science, 2022, 44(3): 595-607.] DOI: 10.18402/resci.2022.03.13

# 中国行业间水-能源-食物投入产出关联特征

项潇智<sup>1</sup>, 张雅娴<sup>2</sup>

(1. 四川师范大学地理与资源科学学院, 成都 610101;

2. 西南民族大学青藏高原研究院, 成都 610225)

**摘要:** 国民经济行业通过投入产出关系形成复杂的行业网络, 理解其中的水-能源-食物关联特征是实现国家战略资源协同管理的重要认知基础。本文基于2018年中国投入产出数据, 采用社会网络分析和可计算一般均衡模型方法, 按照“行业网络构建—关联特征识别—仿真模型模拟”的思路, 从网络结构和个体属性角度对行业间水-能源-食物投入产出关联特征进行实证分析。结果表明: ①水利管理业与外围行业具有广泛的投入产出关联且是行业间水、能源、食物产品流通的重要媒介, 该行业及水的生产和供应业产出的增加会带动中国第二、第三产业用水量的高增长; ②能源生产链上游的煤炭开采和洗选、石油天然气开采行业是全局中介行业, 行业产量的增加能够显著扩大所有行业的商品产出规模, 而生产链下游的电热生产供应、炼油和核燃料加工等行业则位居全行业关联网络的核心位置, 所供应的二次能源产品是多类生产活动的基本投入; ③种植业和餐饮业是水-能源-食物行业子网中的主导行业, 且与子网外行业具有广泛而紧密的直接、间接联系, 是中国水、能源和食物协同管理中需要重点关注的行业节点。本文研究成果可以为中国战略资源行业的管理提供决策支持, 为水-能源-食物关联研究提供方法和案例参考。

**关键词:** 水-能源-食物关联; 投入产出; 行业网络; 社会网络分析; 可计算一般均衡模型

DOI: 10.18402/resci.2022.03.13

## 1 引言

水-能源-食物关联是在资源危机背景下被提出并得到发展的资源协同优化管理理念, 其强调水、能源、食物安全之间的内在联系与外界互动, 寻求提高战略资源综合管理能力的方案, 以破解现有或潜在的资源环境问题<sup>[1]</sup>。自2011年德国波恩的“水-能源-食物安全关联会议”至今, 这一理念受到国内外利益相关者的持续关注与支持, 并且已在应用实践中获得广泛认可, 被认为是区域可持续发展和资源安全保障的重要内容<sup>[2]</sup>。

现阶段水-能源-食物关联的研究视角多样, 其在国民经济中的表现方式与基础作用尤其受研究者关注。而国民经济系统中绝大部分的水、能源和

食物经由相关行业收集、生产、加工、供应, 三者与其他产品的流动形成了行业间复杂的投入产出关系网, 并同外围经济主体紧密交互<sup>[3]</sup>, 这种以行业间产品的投入产出为载体的水-能源-食物关联(以下简称“行业间水-能源-食物投入产出关联”)因而成为关联研究的重要内容。相关研究一方面聚焦于对区域发展影响重大的水、能源和食物行业, 核算相关产品生产的资源投入量, 以此评估3类要素在行业内或行业间的直接消耗强度<sup>[4-7]</sup>; 一方面构造关联特征评价指标体系, 通过多目标规划探寻设定情景中各行业的优化生产与管理方案<sup>[8-10]</sup>。日益丰富的研究成果对区域资源协同政策的制定具有重要意义, 也为后续研究提供了大量的产品投入产

收稿日期: 2021-09-23, 修订日期: 2021-11-28

基金项目: 西南民族大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(2021NQNCZ25); 四川师范大学自然科学类科研基金项目(ky20200901)。

作者简介: 项潇智, 男, 山东烟台人, 助理研究员, 主要研究方向为资源经济与管理, 产业结构与区域发展。E-mail: xiangxz@sicnu.edu.cn

通讯作者: 张雅娴, 女, 辽宁东港人, 助理研究员, 主要从事生态系统评估、复杂网络分析等研究。E-mail: zhangyx@swun.edu.cn

出数据。但同时应当指出,现阶段行业间水-能源-食物投入产出关联的研究仍需深入讨论两个关键问题:一是基于哪些特征从全行业投入产出关系中遴选居于主导地位的水、能源、食物行业,并确定其间的核心关联<sup>[11]</sup>;二是仿真优化中如何更好地兼顾行业间的直接关联与循环经济系统中的间接影响因素,以实现关联效应的综合定量评估<sup>[12]</sup>。对于上述问题,一种可行的解决思路是借助网络分析方法对相关行业的投入产出联系进行全局分析,并将识别出的关联特征刻画在经济数学模型中,在完整的“社会经济-资源环境”系统中评价关联作用机制。

社会网络分析(Social Network Analysis, SNA)是定性和定量研究社会行动者结构关系特征的一种方法<sup>[13]</sup>,而可计算一般均衡(Computable General Equilibrium, CGE)模型则是模拟经济主体行为与政策措施的主流模型<sup>[14]</sup>。结合投入产出数据,前者常被用于行业网络整体结构、社团类别、个体联系特征的分析,以识别区域主导行业,优化行业结构与发展方式<sup>[15-17]</sup>,制定战略资源或产品的贸易策略<sup>[18,19]</sup>。目前,SNA已成为行业间水-能源-食物关联网络的重要解析方法,商品贸易隐含的资源流动网络<sup>[20,21]</sup>、资源生产管理部门的交流合作网络<sup>[22,23]</sup>则是相关研究者的主要分析对象。在CGE分析框架里,全行业投入产出与消费、贸易、储蓄、投资、征税、转移支付等经济活动形成统一的复杂关联系统,通过市场均衡机制,诸如行业生产技术升级<sup>[24]</sup>、要素供给变化<sup>[25]</sup>、财税政策调整<sup>[26]</sup>等冲击的响应可被全方位测度。凭借坚实的经济数学理论基础和量化开放式复杂系统的优势,CGE模型被视为水-能源-食物关联仿真优化与决策支持的重要工具<sup>[12,27]</sup>,应用范围也已从两部门局部的投入产出关联研究扩展至三部门及更多元的关联系统研究<sup>[28,29]</sup>。

鉴于此,本文尝试结合SNA与CGE的分析框架,以国民经济行业系统为切入点,基于2018年中国投入产出数据构造行业关联网络模型,通过分析网络的拓扑特征,识别水-能源-食物投入产出关联中的关键行业与路径;进而依据整体网络与关键行业特征构造社会核算矩阵,以水、能源、食物初始投入变化为冲击设置情景并进行模拟,根据商品产出及要素需求变量的变动情况评估行业间的关联效

应。为中国战略资源行业的协同管理提供科学依据,为水-能源-食物关联研究提供方法和案例参考。

## 2 研究方法 with 数据来源

### 2.1 研究方法

#### 2.1.1 行业关联网络构建

行业关联包括行业间的产品、技术、价格、劳动就业和投资等多种联系,并以产品的投入产出数量关系为基础<sup>[30]</sup>;故在行业关联网络的视角下,国民经济行业被视作网络中的节点,行业间产品的投入产出关系构成网络中的边<sup>[31]</sup>。网络各节点名称设置与2018年中国153部门投入产出表<sup>[32]</sup>账户相一致。由于行业间投入产出关系数目多且差异大,参照严晓辉等<sup>[33]</sup>的研究,运用Weaver-Thomas指数方法对其进行筛选,以获取其中的有效关联(强关联)。规定投入产出表的直接消耗矩阵为 $E=(e_{\alpha\beta})_{m \times m}$ ,其中 $\alpha$ 和 $\beta$ 分别代表指标和行业, $m$ 为矩阵(方阵)的维度,则按指标值升序排序后的第 $j$ 个行业第 $i$ 个指标的Weaver-Thomas指数 $WT$ 的表达式为:

$$WT_{ij} = \sum_{i=1}^m (U_{zi} - 100e_{zj} / \sum_{z=1}^m e_{zj})^2 \quad (1)$$

$$\text{其中: } U_{zi} = \begin{cases} 100/i, & z \leq i \\ 0, & z > i \end{cases}, z = 1, 2, \dots, m$$

设第 $j$ 行业下最小的Weaver-Thomas指数值( $\min WT_{ij}$ )为 $WT_{kj}$ ,此时 $k$ 值对应的直接消耗系数 $e_{kj}$ 即为本行业的关联阈值。进而根据阈值与行业中直接消耗系数的大小关系构建行业关联网络的二值矩阵 $Q=(q_{ij})_{m \times m}$ ,其中:

$$\begin{cases} q_{ij} = 1, & e_{ij} \geq e_{kj} \\ q_{ij} = 0, & e_{ij} < e_{kj} \end{cases} \quad (2)$$

利用二值矩阵构建行业关联网络,矩阵中数值为1的行业对之间有边连接,即存在有效关联,而数值为0的行业对之间则不存在边。仅保留行业关联网络中主要经济活动与水、能源、食物生产供应相关的行业节点及其间的边,则形成水-能源-食物行业子网。以上网络的可视化均通过Gephi软件完成。

#### 2.1.2 核心行业与关联路径识别

SNA方法是一种针对关系数据的跨学科分析

2022年3月

方法,可以从全局结构和个体影响两方面对社会行动者的关联进行有效测度<sup>[34]</sup>。在行业关联网络的基础上,本文运用SNA方法分析国民经济行业关联结构,识别核心水-能源-食物行业及其关联路径。主要评估的指标包括平均最短路径、平均聚类系数和中心度(节点中心度、中间中心度、接近中心度)。其中,平均最短路径为联系任意行业所需通过的行业数的均值,平均聚类系数表示与同一行业存在有效关联的行业间也存在有效关联的概率均值,2个指标分别反映行业关联网络的连通性和集聚性,并共同反映其小世界特征<sup>[15,35]</sup>。节点中心度是与某行业产生有效关联的行业数目,由出度值和入度值组成,分别体现该行业对其他行业的直接推动和拉动作用<sup>[36]</sup>。中间中心度为某行业处于其他行业间最短路径的几率总和,反映行业对网络中要素、商品交换的控制能力<sup>[37]</sup>。接近中心度是某行业到所有其他行业的最短路径距离和的倒数,用以判断行业在产业链中的位置与关联路径的长短,可进一步分为出接近中心度和入接近中心度<sup>[38]</sup>。各指标的计算均在Ucinet软件中进行,公式如表1所示。此外,依据Breiger等<sup>[39]</sup>提出的Concor聚类算法,重复计算网络矩阵各列间的相关系数直至数值不变,将水-能源-食物行业子网划分为若干个凝聚子群,以进一步考察水-能源-食物行业间的关联紧密程度。

### 2.1.3 行业间水-能源-食物投入产出关联仿真模拟

一般均衡理论是经济学的著名理论之一,它从

生产技术、要素禀赋、居民偏好等基本假设出发,建立了关于经济系统均衡的存在性、稳定性和唯一性的公理化体系,CGE模型则将该理论体系转化为用于现实经济模拟的、数值可计算的、实际模型<sup>[40]</sup>。本文基于行业关联网络特征指标的测度结果以及水、能源、食物部门的收支情况、管理方式,设置CGE模型的账户与参数体系,在完整的循环经济系统中实现行业间水-能源-食物投入产出关联仿真与定量评估。CGE模型的基本变量设置、函数表示形式参考Lofgren等<sup>[41]</sup>的“标准CGE模型”。模型基本结构如图1所示。

模型方程组分为生产、商品分配与贸易、机构行为、均衡4个模块。在生产模块中,各类生产投入按照常替代弹性(Constant Elasticity of Substitution, CES)关系进行多层嵌套组合,其中资源要素投入的嵌套方式参照GTAP-E<sup>[42]</sup>、GTAP-W<sup>[43]</sup>等应用广泛的资源CGE模型,各类中间产品按照里昂惕夫(Leontief, LT)函数关系进行配置。商品分配与贸易模块中,进出口商品与国内商品的非线性关系由阿明顿(Armington)关系和常转换弹性替代(Constant Elasticity of Transformation, CET)关系表示。以上关系的基本函数形式如下:

$$\begin{cases} FY = w_1 x_1 + w_2 x_2 \\ Y = A [\delta x_1^\rho + (1 - \delta) x_2^\rho]^{\frac{1}{\rho}} \\ \frac{w_1}{w_2} = \frac{\delta_1}{\delta_2} \left( \frac{x_2}{x_1} \right)^{1-\rho} \end{cases} \quad (3)$$

表1 网络特征指标计算公式

Table 1 Calculation formulas of network characteristic indices

指标	计算公式	变量解释
平均最短路径	$AL = \frac{\sum d_{jp}}{m(m-1)}$	$AL$ 为平均最短路径长度; $d_{jp}$ 为行业 $j$ 和行业 $p$ 间最短路径上的边数; $m$ 为行业总数。
平均聚类系数	$AC = \sum \frac{v_j}{mn_j(n_j-1)}$	$AC$ 为平均聚类系数; $n_j$ 为与行业 $j$ 相连的边数; $v_j$ 为行业 $j$ 相邻行业间的边数。
节点中心度	$DC_j = \sum_{p=1}^m q_{jp} + \sum_{p=1}^m q_{pj}$	$DC_j$ 为行业 $j$ 的节点中心度; $q_{jp}$ 和 $q_{pj}$ 为二值矩阵中的对应元素; 式中前后两项分别为出度值和入度值。
中间中心度	$BC_j = \sum \frac{b_{jt}}{b_{st}}$	$BC_j$ 为行业 $j$ 的中间中心度; $b_{st}$ 为行业 $s$ 和行业 $t$ 间的最短路径数; $b_{jt}$ 为行业 $s$ 和行业 $t$ 之间经过行业 $j$ 的最短路径数。
接近中心度	$\begin{cases} OCC_j = \frac{1}{\sum_{p=1}^m r_{jp}} \\ ICC_j = \frac{1}{\sum_{p=1}^m r_{pj}} \end{cases}$	$OCC_j$ 、 $ICC_j$ 分别为行业 $j$ 的出接近中心度和入接近中心度; $r_{jp}$ 为行业 $j$ 至行业 $p$ 最短路径上的边数; $r_{pj}$ 为行业 $p$ 至行业 $j$ 最短路径上的边数。



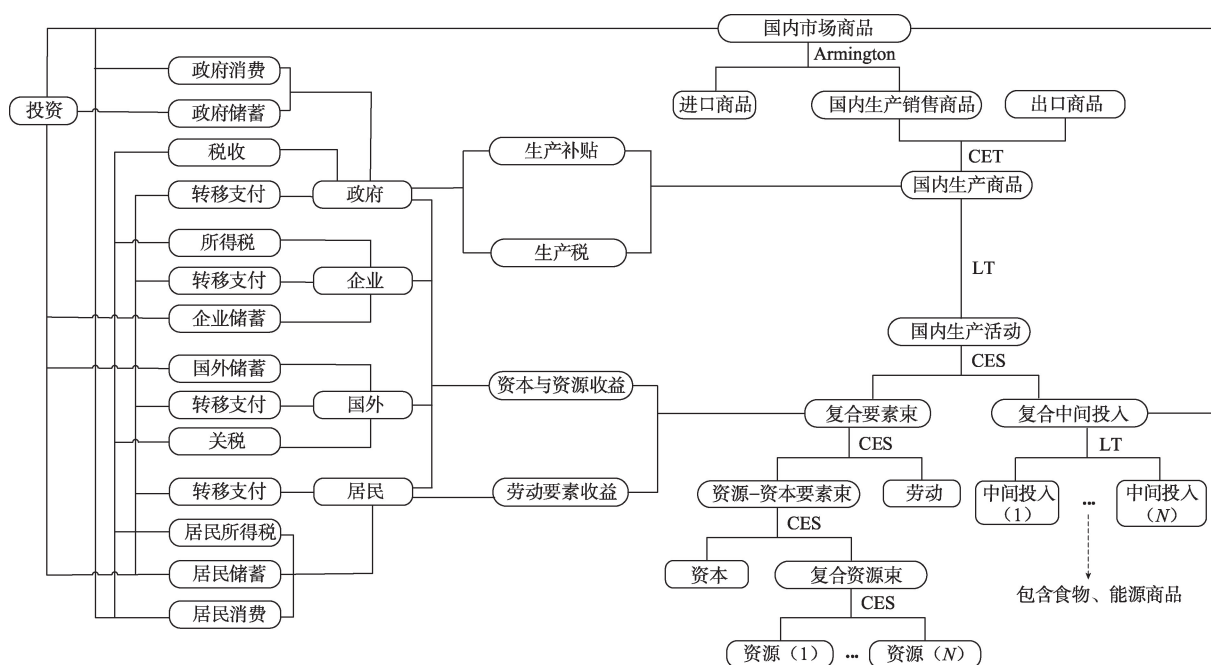


图1 本研究CGE模型基本结构

Figure 1 Basic structure of the computable general equilibrium (CGE) model in this research

式中： $F$ 、 $Y$  分别为复合价格和总产出； $x_1$ 、 $x_2$  为2类不同要素(或商品)投入，其对应的价格分别为  $w_1$ 、 $w_2$ ； $A$ 、 $\rho$ 、 $\delta$  分别为函数的规模参数、替代弹性参数和份额参数。

机构行为模块中，居民、政府的消费活动按照柯布-道格拉斯效用函数关系实现偏好，即消费在每种商品上的支出比例固定，各经济主体均收支平衡。均衡模块中，模型闭合规则为路易斯闭合(资本量有限而劳动力充足)，各类资源要素投入量外生给定。为从实物量角度测度投入产出关联，本文以单位资源要素投入量变化作为冲击，通过模型仿真展示各行业产出及要素分配的响应。以上CGE模型编程以及情景模拟均在GAMS软件中实现。

## 2.2 数据来源与处理

2018年中国153部门投入产出表是构建行业关联网络的主要数据来源。根据网络整体特征与关键水-能源-食物行业的分析结果，对应《国民经济行业分类》(GB/T4754-2017)的行业活动解释，重新设置投入产出表账户并对单元格数值进行合并或比例分配。按照实际经济循环过程与国际食品政策研究院(International Food Policy Research Insti-

tute, IFPRI)的编制方式，扩展投入产出表框架并补充登记同年的资金流量、国际收支、进出口税率、行业成本收益等核算数据<sup>[44-46]</sup>，形成简化而完整的国民经济账户体系，即2018年社会核算矩阵。社会核算矩阵需满足行汇总值等于列汇总值，本文运用双比例平衡技术，根据行列现有汇总值与目标值的比例系数调整行列元素值，通过反复迭代使数值不断逼近，最终实现原始矩阵行列平衡，调平迭代公式如下：

$$SAM_{gh}^l = \frac{RT_g}{\sum_h SMA_{gh}^{l-1}} SAM_{gh}^{l-1} \frac{CT_h}{\sum_g SAM_{gh}^{l-1}} \quad (4)$$

式中： $g$ 、 $h$  分别代表社会核算矩阵的行与列； $SAM_{gh}^l$  代表第  $l$  步迭代中社会核算矩阵的各单元格数据； $RT_g$  与  $CT_h$  分别为行与列的目标值。

以调平后的社会核算矩阵数据为CGE模型中各变量初始值，利用标定技术反推出模型方程组中各类规模参数、份额参数、比例参数的数值。除了主要参数标定，本文参考已有的CGE模型和水资源、能源、农业领域中替代弹性的实证研究<sup>[26,40,47,48]</sup>，对CES函数、CET函数以及阿明顿函数中的替代弹性参数  $\rho$  进行设定。



2022年3月

### 3 结果与分析

#### 3.1 网络视角下的行业间水-能源-食物投入产出关联特征

统计结果显示2018年中国全行业投入产出关系为一有向连通的网络结构(图2)。行业关联网络共有153个节点,1435条边;网络中26个节点与水、能源、食物生产供应相关,形成水-能源-食物行业子网,子网内包含57条边。行业关联网络平均聚类

系数为0.25,平均最短路径为3.2,二者之比为同规模随机网络(连线概率为0.1)的1.9倍,表明行业关联网络具有小世界网络特性,即较好的联通性和强集聚性,为成熟的复杂网络<sup>[15]</sup>。这一特性在42行业关联网络中更为明显<sup>①</sup>,因此仿真模拟中按照2018年42部门投入产出表<sup>[32]</sup>的账户设置方式合并子网之外的行业,在保留行业网络基本特征的同时降低分析难度。

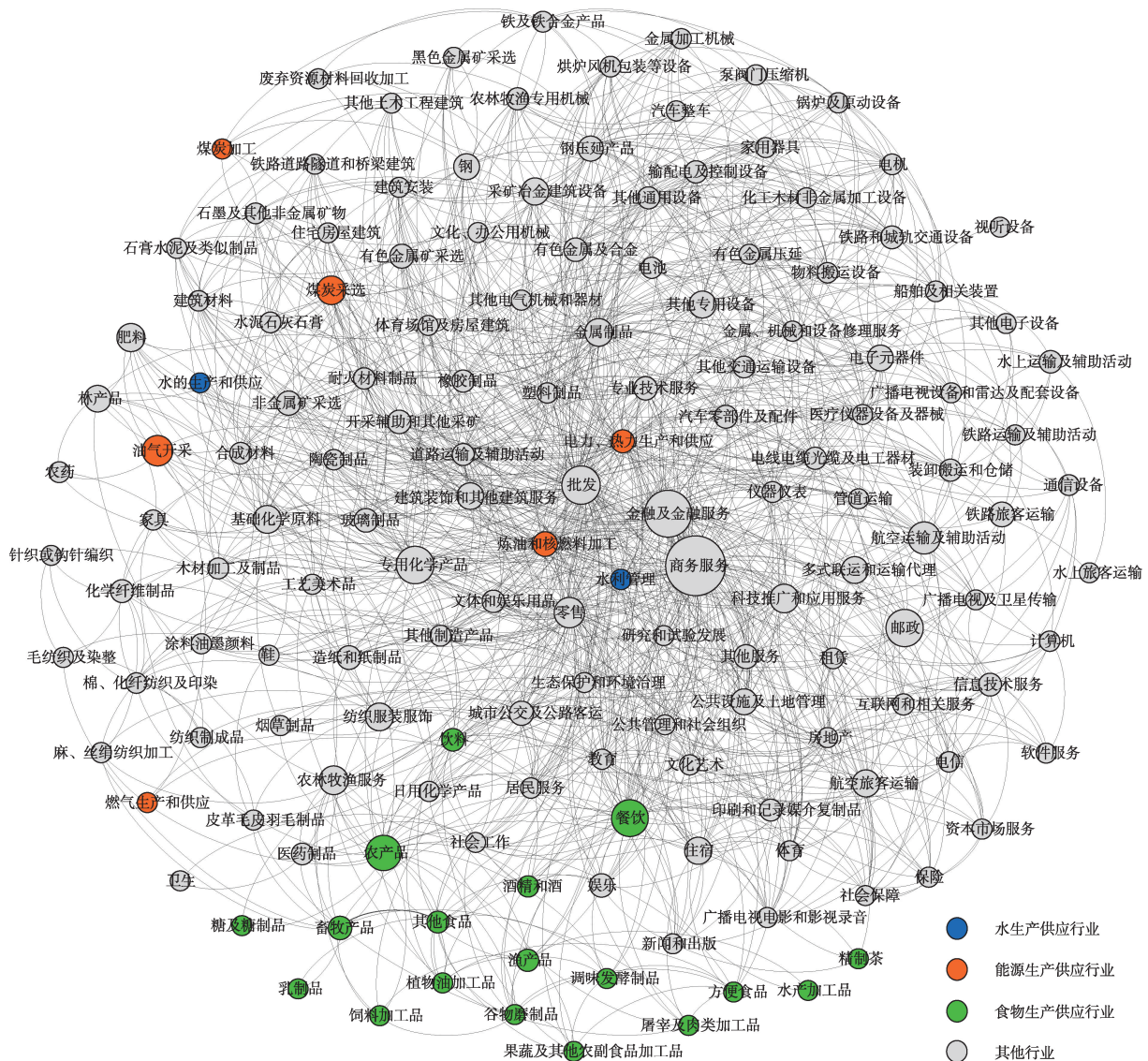


图2 2018年中国行业关联网络

Figure 2 Industry association network in China, 2018

注:位于网络中心的行业节点具有较大的节点中心度,节点大小与其中间中心度成正比。

① 42行业关联网络的平均聚类系数为0.26,平均最短路径为2.5,行业节点名称与2018年中国42部门投入产出表对应,限于篇幅,此处省略网络图,感兴趣的读者可联系作者获取。

在网络个体特征方面,表2展示了行业关联网络中各项中心度指标排名前10%的行业,本文重点关注其中的水、能源、食物生产供应行业。从节点中心度看,电热生产供应、炼油和核燃料加工、餐饮、农产品4个行业在关联网络中的点出度值较高,反映这些行业的产出对整个国民经济行业影响较大,有明显的供给推动作用;水利管理、其他食品行业的点入度值较高,反映这些行业受外围行业影响较大,广泛消费其他中间投入。在水-能源-食物行业子网中,农产品行业的点出度值、餐饮业的点入度值远高于其余行业的对应值,反映上述2个行业位于子网中心位置。从中间中心度值看,餐饮、农产品、油气开采、煤炭采选在153个国民经济行业中分别位列第6、7、9、12位,对行业间的资源交换发挥着关键作用。在水-能源-食物行业子网中,餐饮业、水利管理业的中间中心度最高,反映2个行业是子网内各行业间投入产出交互的“桥梁”,对其他行业节点具有强大控制力。从接近中心度看,所有行业中,水的生产供应业、水利管理业的人接近中心度值较高,表明2个行业与产业链上游行业关联紧密;电力热力生产和供应、炼油和核燃料加工、餐

饮、煤炭采选等行业的出接近中心度值排序靠前,表明这4个行业可通过极短的路径影响其他行业。在水-能源-食物行业子网中,水的生产供应业、水利管理业的人接近中心度依旧呈高值;出接近中心度最高的则为农产品行业,体现该行业产出对食物生产供应链的基础支撑作用。

从凝聚子群情况看,与水、能源、食物生产供应相关的26个行业共形成7个子群(图3)。食物生产供应链有关的行业组成前4个子群,其中子群Ⅰ、子群Ⅱ为农副产品生产、初加工行业,食品制造业和餐饮业则形成了后两个子群(Ⅲ、Ⅳ),展现了食物产出的不同阶段;煤炭产业链和油气产业链分别组成子群Ⅴ和子群Ⅵ,其中电力、热力生产和供应属于子群Ⅴ,与中国煤电为主体的电力生产结构和热电厂集中供热情况相一致<sup>[44]</sup>;水利管理业、水的生产和供应业则组成最后一个子群(Ⅶ),为子网供给天然水、自来水、再生水等水源。

基于上述网络特征分析,可以识别核心水-能源-食物行业及其关联方式。首先,农产品行业(或称种植业)的点出度、中间中心度、出接近中心度均为较高值,表明该行业不仅对下游行业具有广泛的

表2 行业关联网络中心度指标排名前10%行业

Table 2 Top 10% industries of centrality index in the industry association network

排名	点出度值	点入度值	中间中心度	人接近中心度	出接近中心度
1	批发	教育	商务服务	广播电视及卫星传输	批发
2	商务服务	金属、机械和设备修理	金融及金融服务	公共管理和社会组织	金融及金融服务
3	金融及金融服务	研究和试验发展	批发	研究和试验发展	商务服务
4	零售	文化艺术	专用化学产品	文化艺术	零售
5	电力、热力生产和供应	水利管理	邮政	社会保障	电力、热力生产和供应
6	金属制品	生态保护和环境治理	餐饮	社会工作	炼油和核燃料加工
7	炼油和核燃料加工	其他制造产品	农产品	管道运输	废弃资源材料回收加工
8	道路运输及辅助活动	医疗仪器设备及器械	航空运输辅助活动	水的生产和供应	金属制品
9	塑料制品	其他服务	油气开采	教育	道路运输及辅助活动
10	房地产	其他食品	零售	水利管理	房地产
11	钢压延产品	陶瓷制品	农林牧渔服务	生态保护和环境治理	塑料制品
12	专用化学产品	物料搬运设备	煤炭采选	金属、机械和设备修理	专用化学产品
13	有色金属压延	开采辅助和其他采矿	科技推广和应用服务	医疗仪器设备及器械	餐饮
14	餐饮	公共管理和社会组织	肥料	体育	煤炭采选
15	农产品	建筑装饰其他建筑服务	基础化学原料	广播电视电影影视录音	有色金属及合金
I	农产品	餐饮	餐饮	水的生产和供应	农产品
II	谷物磨制品	其他食品	水利管理	水利管理	饲料加工品

注:表中1至15为全行业中心度指标排名,I、II为水-能源-食物行业子网相关行业的中心度指标排名。



2022年3月

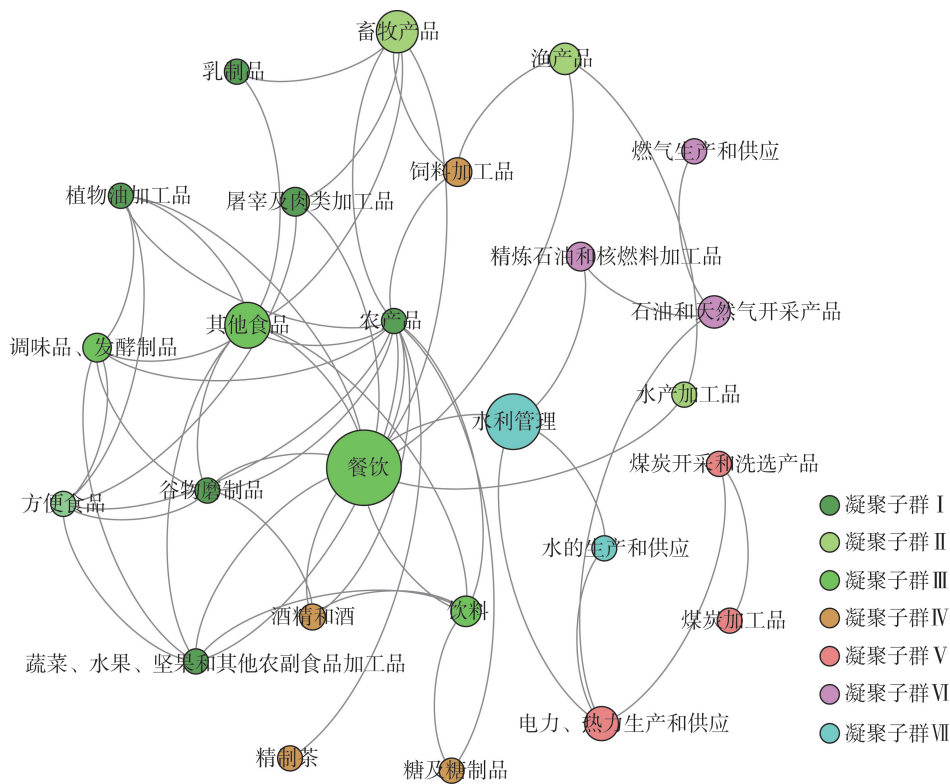


图3 水-能源-食物行业子网及凝聚子群

Figure 3 Water-energy-food industry subnet and cohesive subgroups

注:位于网络中心的行业节点具有较大的节点中心度,节点大小与其中间中心度成正比。

强辐射且控制多类要素、商品的流通;餐饮业的点入度值、中间中心度值、出接近中心度值较高,表征本行业不仅是各类水、能源、食物产品的消费终端,也通过自身服务活动为众多外围行业输送食物。因此,种植业、餐饮业是食物生产供应链、水-能源-食物行业子网乃至整个国民经济行业网络中的关键行业;而其他食物生产供应行业则位于网络边缘,主要以种植业和餐饮业为中介与其他行业产生程度有限的间接关联。其次,尽管水利管理业位于网络中心位置并有高中间中心度值,但该行及其下游的水的生产供应业与外围行业的关联,多是通过中间投入的需求而非供给产生。这是因为各类生产、服务活动的水费支出占比普遍较低,部分关联在以价值量数据构建行业网络时未被识别,一定程度上反映了天然水、自来水产品的低价微利特征<sup>[49]</sup>。就能源行业而言,煤炭开采和洗选行业、石油天然气开采行业所提供的能源占到中国一次能源总供给的90%<sup>[45]</sup>,但行业节点中心度较低,均位于整

个网络及子网的边缘位置,主要通过影响下游的二次能源生产供应行业与外围行业产生关联,并成为全局中介行业。电热生产供应、炼油和核燃料加工行业的点出度值、出接近中心度值很高,但中间中心度值排序靠后,表明2个行业位于关联网的中心位置,所提供的二次能源产品被众多外围行业(尤其是子网以外的行业)直接消费且在行业总支出中占比较高。燃气生产和供应业、煤炭加工业同样位于油气产业链和煤炭产业链的下游,2个行业的各项中心度指标值均比较低,反映行业影响力有限,投入产出流向比较集中。

### 3.2 水、能源、食物投入变化对行业产出及要素需求的影响

扩展“标准CGE模型”的关键是对初始投入(要素)和中间投入(商品/活动)的区分设置<sup>[26]</sup>。考虑到农产品行业居于网络核心位置且涉及多类种植活动,首先按照《国民经济行业分类》(GB/T4754-2017)的“中类”分类规则细分农产品行业,将与食



物生产无关的活动并入林产品行业,同时把行业中常规且刚性的生产要素——耕地设置为专属要素。其次,由于水利管理、煤炭开采和洗选、石油天然气开采行业位于相关产业链上游,主要产品——天然气、煤炭和油气直接取自自然界,在模型中将

这些产品设置为初始生产要素,并将油气进一步分为原油和天然气。至于水的生产与供应业所提供的自来水(也包括再生水、淡化海水等商品,以下统称为自来水),考虑到其刚性价格、与天然水间具有强替代性,被广泛消费且收支额对宏观经济的影响

程度较小,故也视为生产要素。除了以上6类资源要素,行业网络中其他行业的产出均设置为商品。为简化账户,按照行业中心度、凝聚子群以及实际产值情况,结合2018年中国42部门投入产出表<sup>[32]</sup>的设置,对商品子账户进一步合并,共形成29个账户(表3)。

这里以单位资源要素投入(供给)量变化作为冲击,运用CGE模型定量模拟冲击后各行业的产出及要素需求响应情况。为便于结果展示和比较分析,变化方向统一设置为总量增长,增幅均为

表3 资源要素投入变化情景下的行业商品产出与要素需求变化(%)

Table 3 Changes of commodity output and factor demand under scenarios of resource factor variations (%)

商品/要素账户	S1		S2		S3		S4		S5		S6	
	CO	FD	CO	FD	CO	FD	CO	FD	CO	FD	CO	FD
谷物	0.14	10.42	0.06	5.14	0.02	5.91	0.69	3.69	0.97	—	0.18	—
豆、薯类	0.14	12.97	0.03	3.39	0.02	5.99	0.69	3.71	0.98	—	0.18	—
油料	0.15	11.64	0.03	3.91	0.02	5.97	0.69	3.70	0.97	—	0.18	—
糖类	0.13	10.09	0.05	4.54	0.02	5.94	0.69	3.69	0.97	—	0.18	—
蔬菜	0.10	8.64	0.05	4.98	0.02	5.92	0.68	3.68	0.97	—	0.18	—
瓜果	0.09	8.85	0.05	4.62	0.02	5.93	0.68	3.68	0.97	—	0.18	—
棉花及其他作物	0.11	9.09	0.07	6.28	0.02	5.87	0.69	3.67	0.97	—	0.18	—
畜牧业产品	0.03	—	0.04	10.91	0.02	6.13	0.63	9.53	0.86	—	0.16	—
渔产品	0.02	—	0.03	11.31	0.01	5.88	0.52	9.41	0.77	—	0.14	—
林产品及其他农产品	0.02	—	0.05	10.61	0.03	6.59	0.65	9.55	0.80	—	0.16	—
其他采矿业产品	-0.01	—	0.07	11.33	0.06	10.26	1.53	10.99	0.93	—	0.34	17.11
谷物磨制品	0.06	—	0.04	—	0.02	10.33	0.59	9.69	0.84	—	0.16	—
饲料加工品	0.04	—	0.04	—	0.02	10.33	0.61	9.68	0.87	—	0.16	—
油、糖、肉类、水产品	0.04	—	0.04	—	0.02	10.33	0.58	9.67	0.86	—	0.16	—
其他农副食品	0.06	—	0.04	—	0.02	10.36	0.61	9.60	0.87	—	0.16	—
方便食品和乳制品	0.03	—	0.03	—	0.02	10.34	0.53	9.52	0.76	—	0.14	—
其他食品	0.04	—	0.03	—	0.03	10.38	0.55	9.51	0.80	—	0.15	—
酒、饮料和茶加工品	0.01	—	0.04	11.23	0.04	10.27	0.63	9.69	0.79	—	0.16	—
烟草、纺织、木材制品	0.03	—	0.04	—	0.04	10.37	0.82	9.73	0.88	—	0.20	—
造纸印刷和文教用品	0.00	—	0.09	11.50	0.04	10.13	0.98	10.07	0.86	—	0.21	—
石油和核燃料加工品	0.00	—	0.02	11.19	0.01	10.28	0.76	4.32	5.09	9.05	0.45	4.06
煤加工产品	0.00	—	0.04	11.29	0.03	10.20	1.22	5.20	0.72	8.90	0.25	16.90
化学产品	0.01	—	0.07	11.39	0.04	10.14	1.39	13.04	1.62	23.22	0.30	17.94
金属冶炼和金属制品	-0.01	—	0.03	11.20	0.03	10.26	1.27	10.81	0.50	—	0.23	17.45
其他制造产品	-0.01	—	0.03	11.12	0.06	10.35	1.25	10.46	0.61	—	0.24	16.95
电、热、燃气生产供应	0.00	—	0.05	10.02	0.03	7.08	1.29	9.95	0.95	—	0.32	15.73
建筑	0.00	—	0.00	—	0.00	10.43	0.05	8.59	0.04	—	0.01	—
餐饮	0.00	—	0.02	—	0.02	10.33	0.65	9.56	0.90	—	0.17	—
其他服务	0.00	—	0.02	11.08	0.02	10.32	0.39	9.27	0.52	—	0.10	—

注:表中“—”表示商品生产未利用到投入发生变化的资源要素,数值“0.00”代表变化幅度小于0.005%。

2022年3月

10%。基于此,本文设定S1至S6共6个情景,分别代表耕地、天然水、自来水、煤炭、原油、天然气要素的投入量增长10%,对应情景下行业商品产出(Commodity Output, CO)和对变化要素需求(Factor Demand, FD)的变动如表3所示。

S1情景模拟结果显示,作为种植业部门的刚性生产要素,耕地面积(投入)增加10%对种植业以外行业产出影响微弱,种植业产出增幅也在0.15%以下。结合模型其他变量的变化情况,这一产出变化特征主要反映了耕地面积增长时其他互补要素、中间产品对本行业生产规模扩大的限制,例如该情景中用于谷物生产的天然水(灌溉水)和资本要素仅能够增长5.15%和2.97%。尽管未使用耕地资源,但由于食品原料——农产品产出的增加,各食品制造行业产出也有相对明显的增长,反映了食物生产链中的间接关联效应。从行业内要素变化情况看,豆、薯类和油料种植业对耕地要素需求的增长程度最高(11%以上),而蔬菜、瓜果种植业的需求增幅则相对较小(9%以下)。这种差异与耕地要素对生产活动的约束性密切相关,例如豆、薯类种植活动的耕地成本在总生产成本中的占比高达40%,而在蔬菜种植活动中该值仅为11%<sup>[46]</sup>。

S2、S3情景模拟结果显示,天然水、自来水投入变化对各行业产出影响程度较低,与供水行业低出度的网络特征相吻合;但与耕地增长情景不尽相同,在一定程度上反映了用水成本对各行业生产的弱约束性。天然水投入(供给)增加10%时,各行业用水增幅差异显著。各种种植业用水增幅均小于7%,明显低于其他行业,其中又以豆、薯类种植增幅最低,造纸印刷和文教用品增幅最高,侧面反映了工业原水的水价高于灌溉用水。自来水投入增加10%时,第一产业各行业与电、热、燃气生产供应业的用水增长相对不显著,增幅在7%以下;其他工业、服务业部门的用水增长较明显,增幅在10%以上。由于除了少数特种行业(如洗车业、洗浴业)自来水水价较高外,大多数行业用水价格统一<sup>[49]</sup>,这种需求变化差异更多地体现了第一产业以及电、热、燃气生产供应业中要素间(尤其是自来水与天然水)的低替代弹性,自来水供给增长冲击对此类行业生产要素配比的影响较小。

S4、S5、S6情景模拟结果显示,化石能源投入量变化对各行业商品产出的影响较显著。其中,煤炭投入增加10%除了促进产业链下游的煤加工和电、热、燃气生产供应业产出的增加,也将增大其他采矿业产品、化学产品、金属冶炼和金属制品等煤耗较高行业的生产规模,增幅均在1.2%以上,对建筑业、服务业的影响则相对有限。原油总投入增加10%,将显著影响石油和核燃料加工品、化学产品的生产,前者产出增幅高达5.09%。天然气投入增加10%时,石油和核燃料加工品产出增幅最大(0.45%),化学产品,其他采矿业产品,电、热、燃气生产供应等行业的产出也有一定程度增长,增幅在0.30%以上。另外可以发现,生产活动中直接利用原油的行业较少,且S5中新增原油的热值仅是S4中新增煤炭热值的30%(按电热当量法折算),但S5中大多数行业的产出增幅却高于S4,体现了原油投入对国民经济行业系统的高影响力。在要素需求变化方面,S4、S5、S6情景下化学产品行业的化石能源需求增长最为明显,反映了该行业对一次能源的高度依赖且其生产活动中各能源要素具有高替代性,例如原油供给新增10%时(S5),行业的煤炭、天然气需求将分别减少2.02%和5.38%。

## 4 结论

本文基于2018年中国投入产出数据,通过Weaver-Thomas指数方法建立了中国153行业关联网络和包括26个行业节点的水-能源-食物行业子网,耦合SNA分析技术和CGE模型,定性定量评价了中国国民经济行业间水-能源-食物投入产出关联特征。主要结论如下:

(1)水利管理、水的生产和供应行业为中国国民经济行业生产活动提供基本的水资源要素。其中水利管理行业不仅位居整个网络的中心位置,与外围行业产生广泛、直接的投入产出关联;而且是水-能源-食物行业子网内部交互的“桥梁”,对行业间的产品流通、资源交换具有强大的调控作用。从资金流量看,2个行业均位于投入产出关联链的下游,对子网中大多数行业起着需求拉动作用。从实物量看,2个行业产出(天然水、自来水)的增加对其他行业产出影响程度微弱;新增水量会带动各行业用水量的显著增加,其中第二、第三产业用水量增

长率要高于第一产业部门(尤其是种植业)。

(2)电热生产供应、炼油和核燃料加工行业位居行业关联网络的中心位置,所提供的二次能源产品与多类生产活动呈现强关联。煤炭开采和洗选、石油天然气开采、燃气生产和供应业、煤炭加工等4个行业均位于行业网络及水-能源-食物行业子网的边缘位置,与其他行业的直接联系较少。通过连通二次能源行业与外围行业的生产活动,煤炭开采和洗选、石油天然气开采行业成为整个网络的关键媒介。行业产出——煤炭、原油、天然气的增加将扩大所有行业的商品产出规模,并以二次能源和化学产品最为显著;同时,化学产品行业的能源需求也随之大幅增长。尽管直接利用原油的行业较少,但相对于煤炭产品,单位热值原油供给的变化对中国行业系统的影响更为明显。

(3)农产品行业(种植业)和餐饮业分别位于食物生产供应链的前后两端,不仅是水-能源-食物行业子网中的主导行业,且与子网外围行业具有广泛而紧密的直接、间接联系,是水-能源-食物协同管理中需要重点关注的行业节点。而生产供应链中间的农副产品生产与初加工行业、食品制造业则位于网络边缘,在关联系统中影响力较低。耕地是种植业部门的刚性生产要素,受制于配套资源、资本、劳动等要素的总量与配置情况,其面积增长对中国粮食产出规模的影响有限,但会使豆、薯类和油料作物的种植面积明显增加。

本文成果可以丰富并拓展水-能源-食物关联的研究思路和内容,但同时也存在一定的局限和提升空间。首先,本文通过Weaver-Thomas指数方法判断行业间的关联强弱,进而构建行业网络。相较于选取非零消耗系数的行业网络构建方法,本方法尽管能够更准确识别资金流量较大的强关联,但可能会忽视某些低价值量的路径,影响个别行业(如水利管理业)特征的把握。其次,受限于投入产出数据的统计口径,目前CGE模型中水、能源行业账户的设置不如食物行业具体,尤其是各类电力生产行业合并在一个账户中,不利于水-能源-食物行业子网特征和相关生产活动的精细化分析。在未来研究中,将以实物流数据为基础,重构水-能源-食物行业子网并分析其网络特征;同时,进一步收集

水与能源行业的经济核算数据,按不同活动类型进行账户划分,使关联特征的测度更为全面、合理。另外,也期望结合现实资源问题或政策,应用耦合模型探讨水-能-食物关联在资源调控活动中的表现方式与影响。

## 参考文献(References):

- [1] Hoff H. Understanding the Nexus Background Paper for the Bonn2011 Nexus Conference[R]. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2011.
- [2] Nhamo L, Mabhaudhi T, Mpandeli S, et al. An integrative analytical model for the water-energy-food nexus: South Africa case study[J]. Environmental Science and Policy, 2020, 109: 15-24.
- [3] Xu M J, Fan B, Zhang Y, et al. Effects of resource-oriented waste management on optimizing water-food-energy nexus in rural China: A material and energy flow analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, DOI:10.1016/j.jclepro.2020.124259.
- [4] Xiang X Z, Jia S F. China's water-energy nexus: Assessment of water-related energy use[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2019, 144: 32-38.
- [5] Sherwood J, Clabeaux R, Carbajales-Dale M. An extended environmental input-output lifecycle assessment model to study the urban food-energy-water nexus[J]. Environmental Research Letters, 2017, DOI: 10.1088/1748-9326/aa83f0.
- [6] 洪思扬, 程涛, 王红瑞. 长江经济带水资源-能源网络特征[J]. 资源科学, 2021, 43(9): 1794-1807. [Hong S Y, Cheng T, Wang H R. Characteristics of the water-energy network in the Yangtze River Economic Belt[J]. Resources Science, 2021, 43(9): 1794-1807.]
- [7] Deng H M, Wang C, Cai W J, et al. Managing the water-energy-food nexus in China by adjusting critical final demands and supply chains: An input-output analysis[J]. Science of the Total Environment, 2020, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137635.
- [8] Yan X C, Fang L, Mu L. How does the water-energy-food nexus work in developing countries? An empirical study of China[J]. Science of the Total Environment, 2019, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134791.
- [9] Hanes R J, Gopalakrishnan V, Bakshi B R. Including nature in the food-energy-water nexus can improve sustainability across multiple ecosystem services[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2018, 137: 214-228.
- [10] Chen J F, Ding T H, Li M, et al. Multi-objective optimization of a regional water-energy-food system considering environmental constraints: A case study of Inner Mongolia, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, DOI: 10.3390/ijerph17186834.



2022年3月

- [11] Li G J, Huang D H, Sun C S, et al. Developing interpretive structural modeling based on factor analysis for the water-energy-food nexus conundrum[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 309-322.
- [12] 张宗勇, 刘俊国, 王凯, 等. 水-粮食-能源关联系统述评: 文献计量及解析[J]. *科学通报*, 2020, 65(16): 1569-1581. [Zhang Z Y, Liu J G, Wang K, et al. A review and discussion on the water-food-energy nexus: Bibliometric analysis[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(16): 1569-1581.]
- [13] 刘军. 整体网分析讲义: UCINET 软件实用指南[M]. 上海: 上海人民出版社, 2007. [Liu J. Handouts of Overall Network: UCINET Software Practical Guide[M]. Shanghai: Shanghai People's Press, 2007.]
- [14] 刘宇, 王宇, 周梅芳, 等. 张掖市水价改革的定量研究: 基于引入水土账户的 CGE 模型[J]. *资源科学*, 2016, 38(10): 1901-1913. [Liu Y, Wang Y, Zhou M F, et al. The impact of Zhangye's water price reform on the economy and water saving using Water-Land CGE model[J]. *Resources Science*, 2016, 38(10): 1901-1913.]
- [15] 王茂军, 杨雪春. 四川省制造产业关联网络的结构特征分析[J]. *地理学报*, 2011, 66(2): 212-222. [Wang M J, Yang X C. The structural features of regional manufacturing industrial association network: A case study of Sichuan Province[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(2): 212-222.]
- [16] 朱艳硕, 王铮, 程文露. 中国装备制造业的空间枢纽: 网络结构[J]. *地理学报*, 2019, 74(8): 1525-1533. [Zhu Y S, Wang Z, Cheng W L. The hub-network structure of China's equipment manufacturing industry[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(8): 1525-1533.]
- [17] 黄晓东, 马海涛, 苗长虹. 基于创新企业的中国城市网络联系特征[J]. *地理学报*, 2021, 76(4): 835-852. [Huang X D, Ma H T, Miao C H. Connectivity characteristics for city networks in China based on innovative enterprises[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(4): 835-852.]
- [18] 刘立涛, 沈镭, 刘晓洁, 等. 基于复杂网络理论的中国石油流动格局及供应安全分析[J]. *资源科学*, 2017, 39(8): 1431-1443. [Liu L T, Shen L, Liu X J, et al. Spatial-temporal features of China's oil trade network and supply security simulation[J]. *Resources Science*, 2017, 39(8): 1431-1443.]
- [19] 彭澎, 程诗奇, 杨宇, 等. 全球液化天然气运输网络特征及其演化[J]. *地理研究*, 2021, 40(2): 373-386. [Peng P, Cheng S F, Yang Y, et al. Research on characteristics and evolution of global LNG transportation network[J]. *Geographical Research*, 2021, 40(2): 373-386.]
- [20] 汪艺晗, 杨瑾, 刘其芸, 等. “一带一路”国家粮食贸易下虚拟水和隐含能源流动[J]. *资源科学*, 2021, 43(5): 974-986. [Wang Y H, Yang J, Liu Q Y, et al. Virtual water and embodied energy transfer in grain trade across the countries along the “Belt and Road”[J]. *Resources Science*, 2021, 43(5): 974-986.]
- [21] Mahjabin T, Mejia A, Blumsack S, et al. Integrating embedded resources and network analysis to understand food-energy-water nexus in the US[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.136153.
- [22] Kharanagh S G, Banihabib M E, Javadi S. An MCDM-based social network analysis of water governance to determine actors' power in water-food-energy nexus[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124382.
- [23] Daher B, Lee S H, Kaushik V, et al. Towards bridging the water gap in Texas: A water-energy-food nexus approach[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 647: 449-463.
- [24] Bai H F, Tang K, Zhao H M, et al. Water policy and regional economic development: Evidence from Henan province, China[J]. *Water Policy*, 2021, DOI: 10.2166/wp.2021.167.
- [25] 贺玲, 崔琦, 陈浩, 等. 基于 CGE 模型的中国煤炭产能政策优化[J]. *资源科学*, 2019, 41(6): 1024-1034. [He L, Cui Q, Chen H, et al. Policy optimization of coal production capacity in China based on a computable general equilibrium model[J]. *Resources Science*, 2019, 41(6): 1024-1034.]
- [26] 娄峰. 中国经济-能源-环境-税收动态可计算一般均衡模型理论及应用[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2015. [Lou F. The Theory and Application of Chinese Economy-Energy-Environment-Tax Dynamic Computable General Equilibrium Model[M]. Beijing: China Social Sciences Press, 2015.]
- [27] Zisopoulou K, Karalis S, Koulouri M, et al. Recasting of the WEF nexus as an actor with a new economic platform and management model[J]. *Energy Policy*, 2018, 119: 123-139.
- [28] Namany S, Al-Ansari T, Govindan R. Sustainable energy, water and food nexus systems: A focused review of decision-making tools for efficient resource management and governance[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 225: 610-626.
- [29] Bardazzi E, Bosello F. Critical reflections on water-energy-food nexus in computable general equilibrium models: A systematic literature review[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2021, DOI: 10.1016/j.envsoft.2021.105201.
- [30] 芮明杰. 产业经济学[M]. 2版. 上海: 上海财经大学出版社, 2012. [Rui M J. Industrial Economics[M]. 2nd Ed. Shanghai: Shanghai University of Finance & Economics Press, 2012.]
- [31] 黄庆华, 胡梦佳. 成渝地区双城经济圈产业关联演化格局分析[J]. *中南大学学报(社会科学版)*, 2021, 27(6): 119-135. [Huang Q H, Hu M J. Analysis of the evolutionary pattern of industrial linkage in the Chengdu-Chongqing Economic Circle[J]. *Journal of Central South University (Social Sciences)*, 2021, 27(6): 119-135.]
- [32] 国家统计局国民经济核算司. 中国 2018 年投入产出表[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020. [Department of National Economic

- Accounts, National Bureau of Statistic. Input-Output Tables of China 2018[M]. Beijing: China Statistic Press, 2020.]
- [33] 严晓辉, 宫昊, 王柏村, 等. 基于Weaver-Thomas模型的西安市工业绿色发展对策分析[J]. 生态经济, 2017, 33(12): 72-76. [Yan X H, Gong H, Wang B C, et al. Countermeasures analysis of industrial green development in Xi'an City based on Weaver-Thomas model[J]. Ecological Economy, 2017, 33(12): 72-76.]
- [34] 王璐, 刘曙光, 段佩利, 等. 丝绸之路经济带沿线国家农产品贸易网络结构特征[J]. 经济地理, 2019, 39(9): 198-206. [Wang L, Liu S G, Duan P L, et al. Network structure of agricultural product trade in countries of the Silk Road Economic Belt[J]. Economic Geography, 2019, 39(9): 198-206.]
- [35] 卜湛, 曹杰, 李慧嘉. 复杂网络与大数据分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019. [Bu Z, Cao J, Li H J. Complex Network and Big Data Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019.]
- [36] 赵巧芝, 闫庆友. 中国产业关联网络的结构特征研究[J]. 统计与决策, 2017, (15): 104-108. [Zhao Q Z, Yan Q Y. Research on the structure characters of industrial association network in China[J]. Statistics & Decision, 2017, (15): 104-108.]
- [37] 杨传明. 新旧常态中国产业全碳足迹复杂网络比较[J]. 自然资源学报, 2020, 35(2): 313-328. [Yang C M. A comparative study on the complex networks of China's industrial total carbon footprint in the new and old normal periods[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(2): 313-328.]
- [38] 朱学红, 彭婷, 湛金宇. 战略性关键金属贸易网络特征及其对产业结构升级的影响[J]. 资源科学, 2020, 42(8): 1489-1503. [Zhu X H, Peng T, Chen J Y. Impact of strategic and critical metals trade network characteristics on the upgrading of industrial structures[J]. Resources Science, 2020, 42(8): 1489-1503.]
- [39] Breiger R L, Boorman S A, Arabie P. An algorithm for clustering relational data with applications to social network analysis and comparison with multidimensional scaling[J]. Journal of Mathematical Psychology, 1975, 12(3): 328-383.
- [40] 钟帅, 沙景华, 沈镭, 等. 城市化背景下不同水资源定价系统对中国宏观经济的影响模拟研究[J]. 资源科学, 2015, 37(12): 2421-2429. [Zhong S, Sha J H, Shen L, et al. Simulation of the impacts of different pricing systems of water resources on the macro-economy based on CGE model on a background of urbanization[J]. Resources Science, 2015, 37(12): 2421-2429.]
- [41] Lofgren H, Harris R L, Robinson S. A Standard Computable General Equilibrium (CGE) Model in GAMS[M]. Washington D. C: International Food Policy Research Institute, 2002.
- [42] Burniaux J M, Truong T P. Gtap-E: An Energy-Environmental Version of the GTAP Model[R]. Technical Papers 28705, 2002.
- [43] Calzadilla A, Rehdanz K, Tol R S. The Gtap-W model: Accounting for Water Use in Agriculture[R]. Kiel Working Papers 1745, 2011.
- [44] 国家统计局. 中国统计年鉴2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook 2019[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.]
- [45] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020. [Department of Energy Statistic, National Bureau of Statistic. China Energy Statistic Yearbook 2019[M]. Beijing: China Statistic Press, 2020.]
- [46] 国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益资料汇编2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019. [Department of Price, National Development and Reform Commission. China Energy Statistic Yearbook 2019[M]. Beijing: China Statistic Press, 2019.]
- [47] Mu Y Q, Cai W J, Evans S, et al. Employment impacts of renewable energy policies in China: A decomposition analysis based on a CGE modeling framework[J]. Applied Energy, 2018, 210: 256-267.
- [48] 毕超, 何旭波. 中国工业分行业能源CES生产函数估计与选择[J]. 统计与决策, 2018, (4): 112-117. [Bi C, He X B. Estimation and selection of energy CES production function for China's industrial subsector[J]. Statistics & Decision, 2018, (4): 112-117.]
- [49] 马中. 中国水价政策研究[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014. [Ma Z. Research on China's Water Price Policy[M]. Beijing: China Environment Press, 2014.]

# The characteristics of the water–energy–food input–output nexus among China’s national industries

XIANG Xiaozhi<sup>1</sup>, ZHANG Yaxian<sup>2</sup>

(1. Institute of Geography and Resources Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China; 2. Institute of Qinghai-Tibetan Plateau, Southwest Minzu University, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** National industries form a complex industrial network by means of their input-output relationships, and comprehending water-energy-food nexus characteristics of the network is an important cognitive basis of the coordinated management of these strategic resources. Based on China’s input-output data in 2018 and using social network analysis and the computable general equilibrium model, we analyzed the water-energy-food input-output nexus from both the network and attribute perspectives. The research framework of this study can be divided into industrial network construction, nexus characteristics identification, and model simulation. The results show that: (1) Water conservancy has extensive linkages with other industries and it is a vital medium for the circulation of water, energy, and food. The output increase of water conservancy and water production and supply industries can contribute to the significant increase of water use in secondary and tertiary industries. (2) Coal mining and washing industry and oil and gas exploitation industry located in the upstream of the energy production chain are the overall intermediary of industrial network, and the increase of their outputs can significantly scale up the production of all commodities. The downstream electric power and heat production and supply industry, and oil refining and nuclear fuel processing industry are in the core position of the network, and the secondary energy sources supplied by them become the basic input of numerous industries. (3) Planting industry and catering industry are leading industries in water-energy-food industrial subnet. They also have widespread and close connections with industries outside the subnet, which makes them more noteworthy in the coordinated management of water, energy, and food. The results of this study can provide decision support for the management of China’s strategic resources industries and a reference of analytical methods and cases for water-energy-food nexus research.

**Key words:** water-energy-food nexus; input-output; industrial network; social network analysis; computable general equilibrium model