

分类号 C8/339
UDC _____

密级 公开
编号 10741

兰州财经大学

LANZHOU UNIVERSITY OF FINANCE AND ECONOMICS

硕士学位论文

(专业学位)

论文题目 中国隐含能流通网络核算及影响因素分析

研究生姓名: 陈荟荟

指导教师姓名、职称: 邓光耀、副教授

学科、专业名称: 统计学、应用统计

研究方向: 经济统计应用

提交日期: 2023年5月30日

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 陈莹莹 签字日期： 2023.5.30

导师签名： 邓光耀 签字日期： 2023.5.30

导师(校外)签名： 王水军 签字日期： 2023.5.30

关于论文使用授权的说明

本人完全了解学校关于保留、使用学位论文的各项规定， 同意（选择“同意”/“不同意”）以下事项：

1.学校有权保留本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文；

2.学校有权将本人的学位论文提交至清华大学“中国学术期刊（光盘版）电子杂志社”用于出版和编入CNKI《中国知识资源总库》或其他同类数据库，传播本学位论文的全部或部分内容。

学位论文作者签名： 陈莹莹 签字日期： 2023.5.30

导师签名： 邓光耀 签字日期： 2023.5.30

导师(校外)签名： 王水军 签字日期： 2023.5.30

Calculation of China ' s embodied energy flow network and its influencing factors

Candidate : Chen Huihui

Supervisor : Deng Guangyao

摘 要

随着经济的不断发展，中国能源消耗量与日俱增，能源压力激增，能源贫困等问题不断凸显，引发了国内乃至全球的舆论热议，当前中国的能源消耗量为世界第一，各国都在密切关注未来中国的能源消费状况，提能效、降能耗迫在眉睫。

为实现经济高速发展到经济高质量发展的顺利转变，中国政府发布了一系列节能政策，并制定阶段性计划。由于中国地域面积广阔，省份众多，且发展状况各异，因此为保障国家未来节能政策的实施以及阶段性目标的完成，必须明确各省能耗情况，结合各省的能耗贡献力及影响力，合理分配节能责任及目标。本文使用多区域投入产出模型构建中国省间隐含能流通网络，明确了省与省之间隐含在商品及服务贸易之下的能源流动，由此定位那些隐含能消耗量、转移量较大的省份，从而科学划分节能责任；再利用生态网络模型，对中国省间隐含能流通网络进行上升性和环境元分析，以此发掘流通网络的整体特征以及节点省份之间的生态关系，助力省间隐含能健康格局的协调发展；最后利用 QAP 回归模型建立中国省间隐含能流通网络的影响因素模型，计算各因素对流通网络的影响程度，以此确定节能计划实施的方向。主要研究结论如下：

(1) 从隐含能消耗量变化中可看出，自 2015 年至 2017 年，中国省际隐含能的消耗重心逐渐向北部沿海地区转移，长三角与京津冀地区的隐含能消耗量较高；东北地区中除却低效粗放的黑龙江地区，其余两省隐含能大幅下降；沿海地区的福建、海南受广东、浙江贸易挤压致使隐含能消耗量一直较低；西北、西南地区的隐含能消耗水平较低，邻近的湖南、湖北等中部省份则吸收了较多的隐含能。

(2) 从隐含能进出口值变化中可看出，至 2017 年，京津冀地区的隐含能流动状态较为一致，隐含能净流出值下降明显；黑龙江、重庆、广西、云南、广东、海南、河南、陕西、江苏、浙江、湖南、湖北与江西隐含能一直是净流出状态，安徽、上海、福建、山西、内蒙古、四川、贵州、吉林、辽宁、西北地区则偏向于隐含能流入；长江中游地区省份的隐含能流出量与流入量都在下降。

(3) 从隐含能流转重心来看，长江中游与黄河中游地区的省份在国内隐含能贸易中占据了较多份额，隐含能流动数值较高；西北地区的隐含能总体流动数值及国内占比都偏低；京津冀地区、西南地区的隐含能流动数值及国内占比都略有

下降。浙江、广东、江苏的隐含能流出值一直居于前列，福建、甘肃、海南、青海和宁夏一直处于隐含能流出值中省份排名低位。内蒙古、山西、河北和辽宁等能源储备量丰富但经济发展偏中游省份的隐含能流出值较高，宁夏、青海和海南等地的隐含能流出、流入值都偏低。

(4) 在上升性分析中，2017 年的系统平均交互信息值 AMI 要高于 2015 年，省间贸易隐含能的总流通量 TST 在下降，系统多样性指数 H_R 以及系统抵抗外界干扰变化的能力 S 都略有上升趋势，整体看来系统的信息交互限制和组织能力变高，结构约束不断被强化，隐含能在省间流通会更有效率，系统经历变化的能力上升。系统上升性 A 和发展能力 C 都在增加，系统恢复弹力 R 则出现下降趋势，表明外界环境对于系统的干扰力度减小。2015 年和 2017 年的 α 值相对过高，整体网络偏向于高效率强脆弱的不可持续状态。

(5) 在环境元分析中，从通量分析来看，流通系统的通量重心偏于江苏、广东、河南、河北以及山东；甘肃、宁夏、青海和海南四个省份处于系统边缘，通量占比都在 0.5% 以下；从效用分析来看，2015 年中国省间隐含能流通系统中省间互惠与竞争关系占比较少，2017 年系统中省间生态关系只剩下控制与被控制关系。

(6) 针对中国省间隐含能流通网络建立 QAP 回归模型可知，经济发展水平差异、人口规模差异、能源结构差异都会对中国省间隐含能流通网络产生正向影响；地理距离会对中国省间隐含能流通网络产生负向影响。

关键词： 隐含能贸易 投入产出 生态网络分析 QAP 回归

Abstract

With the continuous development of economy, the energy consumption of China and the world is increasing, which makes the energy pressure of China and the world increase sharply, and energy poverty and other issues become increasingly prominent, which has triggered heated debate at home and abroad. At present, China's energy consumption is the first in the world, and its proportion in the world is also the first. All countries are paying close attention to China's energy consumption in the future, and it is urgent to improve energy efficiency and reduce energy consumption.

In order to realize the smooth transition from rapid economic development to high-quality economic development, the Chinese government has issued a series of energy-saving policies and formulated a phased plan. Due to China's vast geographical area, numerous provinces and different development conditions, in order to ensure the implementation of the national energy conservation policy in the future and the completion of the phased objectives, it is necessary to clarify the energy consumption situation of each province, and rationally allocate the energy conservation responsibilities and objectives in combination with the energy consumption contribution and influence of each province. This paper uses

the multi region input-output model to build China's inter provincial embodied energy circulation network, which clarifies the energy flow embodied in the trade of goods and services between provinces, thus positioning those provinces with large embodied energy consumption and transfer, so as to scientifically divide energy conservation responsibilities; Then use the ecological network model to analyze the rising and environmental meta analysis of China's inter provincial latent energy circulation network, so as to explore the overall characteristics of the circulation network and the ecological relationship between node provinces, and help the coordinated development of the healthy pattern of inter provincial latent energy; Finally, the QAP (Quadratic Assignment Procedure) regression model is used to establish the influencing factors model of China's inter provincial latent energy circulation network, calculate the influence degree of each factor on the circulation network, and determine the direction of energy conservation plan implementation. The main research conclusions are as follows:

(1) It can be seen from the change of embodied energy consumption that from 2015 to 2017, the consumption center of China's inter provincial embodied energy gradually shifted to the northern coastal areas, and the embodied energy consumption in the Yangtze River Delta and Beijing Tianjin Hebei region was relatively high; In Northeast China, except for the inefficient and extensive Heilongjiang region, the potential energy of the other two provinces decreased significantly; In coastal areas, Fujian and

Hainan have been squeezed by Guangdong and Zhejiang trade, resulting in low consumption of trade embodied energy; The consumption level of embodied energy in the northwest and southwest regions is low, while the neighboring provinces in central China, such as Hunan and Hubei, have absorbed more embodied energy in trade.

(2) It can be seen from the changes in the import and export value of embodied energy that the flow of embodied energy in Beijing Tianjin Hebei region was relatively consistent by 2017, and the net outflow value of embodied energy decreased significantly; The embodied energy of Heilongjiang, Chongqing, Guangxi, Yunnan, Guangdong, Hainan, Henan, Shaanxi, Jiangsu, Zhejiang, Hunan, Hubei and Jiangxi has always been in the state of net outflow, while the embodied energy of Anhui, Shanghai, Fujian, Shanxi, Inner Mongolia, Sichuan, Guizhou, Jilin, Liaoning and Northwest China tends to flow in; The embodied energy outflow and inflow of provinces in the middle reaches of the Yangtze River are declining.

(3) From the perspective of the center of embodied energy transfer, the provinces in the middle reaches of the Yangtze River and the Yellow River occupy a large share in the interaction of embodied energy in domestic trade, and the value of embodied energy flow is high; The total flow value and proportion of latent energy in northwest China are low; The value and proportion of latent energy flow in Beijing Tianjin Hebei region and the southwest region decreased slightly. The embodied energy outflow value of

Zhejiang, Guangdong and Jiangsu has always been in the forefront, while Fujian, Gansu, Hainan, Qinghai and Ningxia have always been in the low position among the provinces in the embodied energy outflow value. Inner Mongolia, Shanxi, Hebei, Liaoning and other provinces with rich energy reserves but economic development in the middle reaches rank higher, while Ningxia, Qinghai, Hainan and other places have low potential energy inflow and outflow values.

(4) In the ascending analysis, the system's Average Mutual Information (AMI) in 2017 is higher than that in 2015, the Total System Throughput (TST) of the inter-provincial trade embodied energy is declining, the system diversity (H_R) and the system's ability to resist external interference changes are both slightly increasing, indicating that the system's information interaction restrictions and organizational capacity are becoming higher, the structural constraints are constantly strengthened, the embodied energy will be more efficient in the inter-provincial circulation, and the system's ability to experience changes is increasing. The Assortativity (A) and Capacity for Development of the system (C) are increasing, while Resilience of the system (R) is decreasing, indicating that the interference of the external environment on the system is decreasing. 2015 and 2017 α Relatively high, the overall network is inclined to an unsustainable state of high efficiency, strong vulnerability.

(5) In the environmental meta-analysis, from the perspective of flux analysis, the center of flux in the circulation system is biased towards

Jiangsu, Guangdong, Henan, Hebei and Shandong; Gansu, Ningxia, Qinghai and Hainan are at the edge of the system, with the flux accounting for less than 0.5%; From the perspective of utility analysis, the inter-provincial reciprocity and competition relationship in China's inter-provincial embodied energy circulation system accounted for a relatively small proportion in 2015. In 2017, the inter-provincial ecological relationship in the system only remained the control and controlled relationship.

(6) According to the QAP regression model established for the inter-provincial embodied energy circulation network in China, the differences in economic development level, population size and energy structure will have a positive impact on the inter-provincial embodied energy circulation network in China; Geographic distance will have a negative impact on the embodied energy circulation network between provinces in China.

Keywords: Embodied energy trade; Input-output; Ecological network analysis; QAP regression

目 录

1 引 言	1
1.1 研究背景和意义	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 国内外相关研究综述.....	3
1.2.1 隐含能流动测算.....	3
1.2.2 隐含能网络分析.....	4
1.2.3 能源贸易影响因素.....	5
1.2.4 文献述评.....	5
1.3 研究内容及技术路线.....	6
1.3.1 研究内容.....	6
1.3.2 技术路线.....	8
1.4 本文创新之处.....	9
2 理论基础与研究方法	10
2.1 理论基础.....	10
2.1.1 隐含能概念.....	10
2.1.2 投入产出理论.....	10
2.1.3 生态网络分析.....	11
2.2 研究方法.....	12
2.2.1 多区域投入产出模型.....	12
2.2.2 生态网络分析.....	14
2.2.3 QAP 回归分析.....	17
2.2.4 数据来源.....	17
3 中国省间隐含能流动结果分析	20
3.1 中国各省隐含能消耗分析.....	20

3.2 中国各省隐含能流入流出分析.....	22
3.3 中国各省隐含能往来分析.....	24
4 中国省间隐含能流动生态网络分析.....	27
4.1 上升性分析.....	28
4.1.1 系统稳定性分析.....	28
4.1.2 系统可持续性分析.....	29
4.1.3 系统冗余度分析.....	30
4.2 环境元分析.....	31
4.2.1 通量分析.....	31
4.2.2 效用分析.....	32
5 中国各省隐含能流通网络影响因素研究.....	36
5.1 变量选取依据.....	36
5.2 研究假说.....	37
5.3 回归结果分析.....	38
6 结论与建议.....	40
6.1 结论.....	40
6.2 建议.....	41
6.3 展望与不足.....	42
参考文献.....	44
附录.....	50
攻读硕士学位期间承担的科研任务及主要成果.....	52
致谢.....	52

1 引言

1.1 研究背景和意义

1.1.1 研究背景

自改革开放以来，中国经济呈高速发展趋势，依据国家统计局官方数据来看，1980至2009年期间，我国的年均经济增长速度已超9%，是世界经济年均增长率的4倍，对世界的经济总量占比也从1978年的1%增长到约8%，成为世界第三大经济体；2010年中国首次超越日本成为GDP全球排名第二的国家；2016年中国GDP增长至70万亿，6.7%的增长速度位居全球首位，带动全球经济增长1.2%；2017年中国GDP首次达到80万亿的历史新阶段，占据15%的全球经济总量；2021年，我国受疫情影响的经济逐渐恢复，经济增速上升至7.8%，继续在世界经济中发挥巨大贡献。中国对推动世界经济贸易发展、维护经济结构平衡有着重要作用，已成为了“世界发展稳定器”。当今我国现代化建设迅猛发展，随之而来的是国家能源消费量的大幅上涨。在2009年，我国以能源消费总量30.66亿吨标准煤位居世界第二，对世界一次能源消费的贡献率超20%；到2019年时，我国对全球能源消费量净增长的贡献率达到75%以上；BP世界能源统计年鉴报告显示，2020年全球一次能源消费量中，中国消耗量占比达到26.13%，超过欧盟和美国的一次能源消费量占比总和。

与日俱增的能源消耗量使得中国能源压力激增，能源贫困等问题不断凸显，引发了国内乃至全球的舆论热议，当前中国的能源消耗量为世界第一，各国都在密切关注未来中国的能源消费状况。在BP公司最新的《BP世界能源展望（2020年版）》的未来世界能源消费及结构趋势预测中，三种情境下（快速转型、净零排放、维持现状）中国的能源消耗量都将持续上涨，且仍是全球一次能源消耗最多的国家，其中在维持现状情境下，中国能源消费量最高。世界各国都在密切关注未来中国的能源消费状况，提能效、降能耗迫在眉睫。

为实现经济高速发展到经济高质量发展的顺利转变，中国政府发布了一系列节能政策，并制定阶段性计划。2021年9月17日国家发展改革委发布印发《完善能源消费强度和总量双控制度方案》的通知，方案中提到：到2025年，持续健全

能耗双控制度，合理化能源资源配置，大力提升能源资源利用效率。到 2030 年，深入完善能耗双控制度，能耗强度继续大幅下降，能源消费总量得到合理控制，能源结构更加优化。依据十四五规划内容，我国将加强合理化能源资源配置、大幅度提升能源使用效率，GDP 单位能耗降低 13.5%。《“十四五”现代能源体系规划》提出展望，至 2035 年，我国非化石能源使用占比高于 25%，可再生能源与低碳绿色能源成为发电能源主体，广泛建立绿色生产与低碳消费模式，基本实现能源体系现代化，能源高质量发展效果明显。为保障国家未来节能政策的实施以及阶段性目标的完成，必须明确各省能耗情况，结合各省的能耗贡献力及影响力，合理分配节能责任及目标。

1.1.2 研究意义

对于完成国家节能目标的意义。要完成总体的节能目标，就要制定合理的地区分配方案，首先立足于整体发展现状，掌握中国各省科学计算的完全能耗数据。由于中国的能源消费大部分隐含在省间的商品服务贸易中，因而需要构建省间隐含能的核算模型，明确各省能源的消费转移情况，重点分析各省隐含能流动所带来的影响，对当前省间的能源转移状况要有科学、总体的认识，准确定位能源消费不健康发展的省份；其次要考虑省与省之间的差异性。由于各省的经济发展水平、资源矿藏分布状况、地理位置禀赋不尽相同，因此能源消耗强度及降能需求程度都不同，需构建中国隐含能流通网络及影响因素模型，综合分析各节点（省份）的能耗状况、能源流动关系及各因素对隐含能耗的影响程度。为了达到十四五规划目标，中国需要一个基于各省隐含能真实转移消耗情况的任务分配机制，在保证节能与经济发展双面开花的基础上，充分考虑各省对国内隐含能流动的影响及贡献度差异，做到统筹兼顾。相对科学的省际隐含能转移消耗数据，既能为该方向的学术研究带来理论意义，也能为合理分配国家节能目标、降低能源损耗带来现实意义。因此，核算各省隐含能流通数据并利用 QAP 模型进行流通网络影响因素识别有诸多必要性。

对于合理化地区能源配置的意义。由于中国能源矿藏分布不均、生产技术水平参差的空间特征，导致东部地区出现用能紧缺、西部地区用能质量较低的问题（蔡海亚等，2021），为此国家和地区采取了“西气东输”、“西电东送”、“晋煤外运”等诸多能源供给管理工程。这些工程对于缓解我国普遍存在的“能源贫困”

问题有着重大意义。然而目前的能源管理主要关注各地的“直接能耗”，对“隐含能源”缺乏深层的认识，传统基于直接能耗的测算方法容易高估或低估地区的能源消费量（Meng 等，2016），据此制订的能源调配政策可能会导致能源配置效率反弹（王锋和高长海，2020）。而生态网络分析（Ecological Network Analysis，简称 ENA）主要用于刻画系统中各要素的相互作用及节点间能量、资源的流动，结合投入产出方法可对系统进行整体的、全面的内在属性分析（穆献中和朱雪婷，2019），从总投入消费去向的角度分解各省的能源消耗量，明确隐含能消耗的重要环节，由此可探究各省对整体隐含能流通网络贡献及影响的异质性、各省因隐含能流通而产生的相关关系等，使各地隐含能消费转移状况及省间隐含能流动关系清晰化，准确评估省与省之间的依赖和控制关系，更有效地制定区域能源配置方案。

综上所述，研究基于投入产出分析、生态网络分析和 QAP 回归模型，研究 2015 年和 2017 年中国各省隐含能流通网络特性及影响因素，对能源高效配置，缓解部分地区用能困难具有一定的理论和现实意义。

1.2 国内外相关研究综述

1.2.1 隐含能流动测算

在隐含能源的测算领域中，传统的商品能耗是产量与单位能耗系数的乘积，但这种简便计算方法只考虑了商品在最后生产环节所消耗的能源量，未包括商品从原材料初始投入到历经中间所有生产过程以及中间投入材料的能源消耗，所以测算结果会比真实能耗量要小。而隐含能源概念和相关测算方法的提出则从根本上解决了这个问题，虽然还有生命周期评价（Life Cycle Assessment, LCA）等计算手段，但当前对于隐含能源的主流测算方法还是依靠投入产出模型，以此对商品生产进行全过程的完全能耗测算（章辉和蒋瑛，2016），更能深层次地探究能源消费与生产之间的交互关系。其中基于单区域投入产出模型的隐含能核算是针对单个国家或省份，偏向于研究各产业部门之间的隐含能流通关系（高鹏等，2020；王锋，2020）。随着国内的贸易流通深度及强度的增加，区域间的内部联通关系也受到学界的广泛关注（Lenzen, 2012；Guo, 2015）。投入产出法中立身于引力模型的多区域关联分析能较好地探究能源消耗与商品生产贸易之间的交互关系，常

用来研究不同资源、能源的多区域流转效应（姚秋蕙等，2018；Han，2020）。中国跨省跨产业投入产出表的编制也极大地推进了国内省间及产业间隐含能流通分析发展。李方一等（2012）结合国内产业链分工机制及投入产出理论分析了2007年我国区域间贸易隐含能的整体流动格局。Liu等（2012）计算了我国2007年29个工业部门的隐含能消费量，研究发现建筑业与其他服务部门的隐含能消耗较高。Sun等（2017）对国内区域间贸易隐含能的研究显示相比于2002年，在2007年的国内贸易隐含能消耗增加了近两倍。Zhang等（2015）和Guo等（2020）的研究发现中国能源投入整体呈现出由东向西及由北向南移动，能源消费重心出现向东南移动、能源流出重心向东北移动的特征。郭珊等（2021）的研究表明我国中部及东北部地区偏向于隐含能流出，南部及西北地区偏向于隐含能流入。

1.2.2 隐含能网络分析

在隐含能流通网络分析中，已有的文献大多采用复杂网络分析与社会网络分析。Hao等（2016）研究了1996-2012年世界主要国家（地区）的隐含能贸易复杂网络，指出存在以俄罗斯、沙特、美国和日本四个国家为核心的隐含能贸易集团。Gao等（2018）构建中国省间贸易隐含能流通网络，并基于复杂网络分析发现北京、天津等沿海发达省份多处于隐含能净流入状态。Chen等（2018）对1995-2012年世界主要国家的隐含能贸易网络进行复杂网络分析，指出中介能力强的行业在网络中发挥了关键作用。Hong等（2019）构建了2007-2012年中国省间贸易隐含能流通社会网络，通过复杂网络分析法发现广东省常处于网络中的核心地位。Tang等（2019）针对2010年中国省间隐含能流通网络，同样采用复杂网络分析，发现东部沿海地区的江浙沪及河北、广东等省的中心性度数排名较高。袁晋军（2020）构建了全球价值链体系下世界隐含能网络模型，并采用复杂网络分析发现，网络中能源传播方向大体为中国向美国等西方发达国家流入。李怀政和汪宇（2021）基于社会网络分析法研究发现在国际贸易隐含能网络中英法美德等发达国家常处于网络核心地位，同时中国的网络影响能力也在不断增强。杨宇（2022）使用多区域投入产出法解析了各国间能源消耗转移情况，再用复杂网络分析法厘清中国与全球的能源互动关系，指出中国已成为全球能源枢纽国家。

生态网络分析（ENA）主要用于系统中元素、能源、水资源和碳排放等众多资源结构性流动研究，通过构建网络模型对地区或部门的资源和物质流动进行

模拟，进而得出地区或部门的利用效率，可揭示系统的内部功能结构和各部门之间的相互关系（施智敏等，2022）。在资源流通生态网络分析中，以往学者们针对隐含能流动的研究较少。李吉喆（2019）基于 ENA 法探究了广东省碳代谢系统的系统结构与功能关系；彭焜等（2018）研究发现水资源、能源流通网络中电力、热力生产及供应部门在受到水和能源的耦合网络影响时，对其他部门的控制能力会进一步强化；Wang 等（2016）的研究揭示了京津冀地区能源-水耦合网络的生态网络特征及部门之间的生态关系。

1.2.3 能源贸易影响因素

在研究能源贸易影响因素方面，与隐含能相关的研究文献较少。部分研究中发现地理距离对国家间的能源贸易活动存在明显的抑制作用（王薇等，2020）；Li 等（2021）指出在交通运输业上，交通运输技术发展落后是中国大部分中西部城市高隐含能消耗的主要原因，而繁盛的经济贸易活动则是中国大部分东部城市高隐含能消耗的主要原因。而在丝绸之路国家的三大能源贸易影响因素研究中，人均收入差异和人口数量差异拉动了天然气贸易的发展；人均二氧化碳差值、语言文化包容性、制度及地理位置的邻近性均推动了三大能源贸易的发展；只有城镇化差异对三大能源贸易表现出无显著影响（马远和宫圆圆，2021）。针对全球隐含能源贸易网络 and 传统能源贸易网络，经济规模对隐含能贸易网络影响较大，空间联系对传统能源贸易网络影响较大（袁晋军，2019）。虽然对能源贸易的影响因素研究中较多是针对行业贸易隐含能或国际间能源贸易，但也可援引至国内省域间的隐含能消耗影响因素研究。

1.2.4 文献述评

尽管已有学者利用投入产出模型对我国商品服务贸易下的隐含能流动进行了研究，但研究大多着重于部门隐含能消耗及隐含能整体流动格局的分析，基于隐含能流动角度进行中国省间关联分析的较少。而在隐含能源流动分析中单一使用投入产出模型的较多，缺乏网络分析的延伸。在现有的能源流通网络分析中，大多基于社会网络分析与复杂网络分析对全球能源数据进行研究，对节点之间的联通关系（边）赋予权重和方向，研究网络中整体与节点的属性。其中社会网络分析中研究者多关注于节点行动者的位置与角色，通过网络参与度和流通度来判断

行动者是否具备核心节点性质；复杂网络分析中多偏向于整体网络的演化拓扑性质以及节点行动者。使用社会网络与复杂网络分析难以像生态网络分析般识别各省的相互关系、各省与系统的控制关系、更无法判断隐含能流通网络发展的可持续性。且在资源流通生态网络分析中应用在碳排放、水资源流动或能源-水耦合领域的研究较多，针对隐含能源流动的生态网络分析应用亟待展开。在隐含能贸易网络影响因素分析中，较多是针对行业贸易隐含能或国际间能源贸易，隐含能贸易分析中应用 QAP 回归模型较少。

基于以上讨论，本文在多区域投入产出模型的基础上加入了生态网络分析，既能核算地区间隐含能的流通数据，同时还可以分析流通系统的整体网络特征及省份间的生态关系，基于自然生态系统的基础原理，从系统内部的结构分布和功能关系角度出发，在整体-节点的传统网络分析基础上进一步分析隐含能流通系统中各省份的关联关系及影响，探究隐含能源流动系统的发展。最后本文对于中国隐含能流通网络建立 QAP 回归模型，更好的探测省间隐含能流通的影响因素，为合理分配降能责任、制定针对性节能措施、选定高效能源配置方案提供相应的科学依据与理论支撑。

1.3 研究内容及技术路线

1.3.1 研究内容

本文分为六大研究内容，内容划分如下：

第一是绪论。包括研究背景与意义、概念界定、国内外相关研究综述、研究内容与技术路线以及论文的主要创新点。

第二是理论基础与研究方法。主要为两部分，第一部分介绍隐含能、投入产出及生态网络理论，第二部分介绍多区域投入产出理论及生态网络分析指标概念，第三部分介绍中国跨省隐含能流通网络的构建及生态网络分析的具体表达。

第三是中国各省隐含能流动的核算。主要基于编制的中国跨省跨产业投入产出表，测算国内各省的隐含能流动状况。

第四是对中国省间隐含能流动数据进行生态网络分析。主要包括两部分内容，一是上升性分析，主要研究隐含能消耗转移系统的整体网络属性，本文选择总流量 (TST)、平均交互信息 (AMI)、系统稳定性 (S)、系统稳健性 (SR)、系统上

升性（A）、系统发展能力（C）和恢复弹性（R）七大指标来定量评估系统发展程度，在此基础上对中国省间隐含能流通系统进行稳定性、可持续性和冗余度分析；二是环境元分析，主要研究隐含能消耗转移系统内部的节点属性和内在机理特征，本文选择通量分析、效用分析两大测度指标。

第五是针对中国省间隐含能流通网络建立 QAP 影响因素回归模型，探究省际间隐含能转移消耗的影响因素。

第六是结论、建议与展望。包括本文的研究结论、研究建议、展望与不足。

1.3.2 技术路线

本研究技术路线图如下所示：

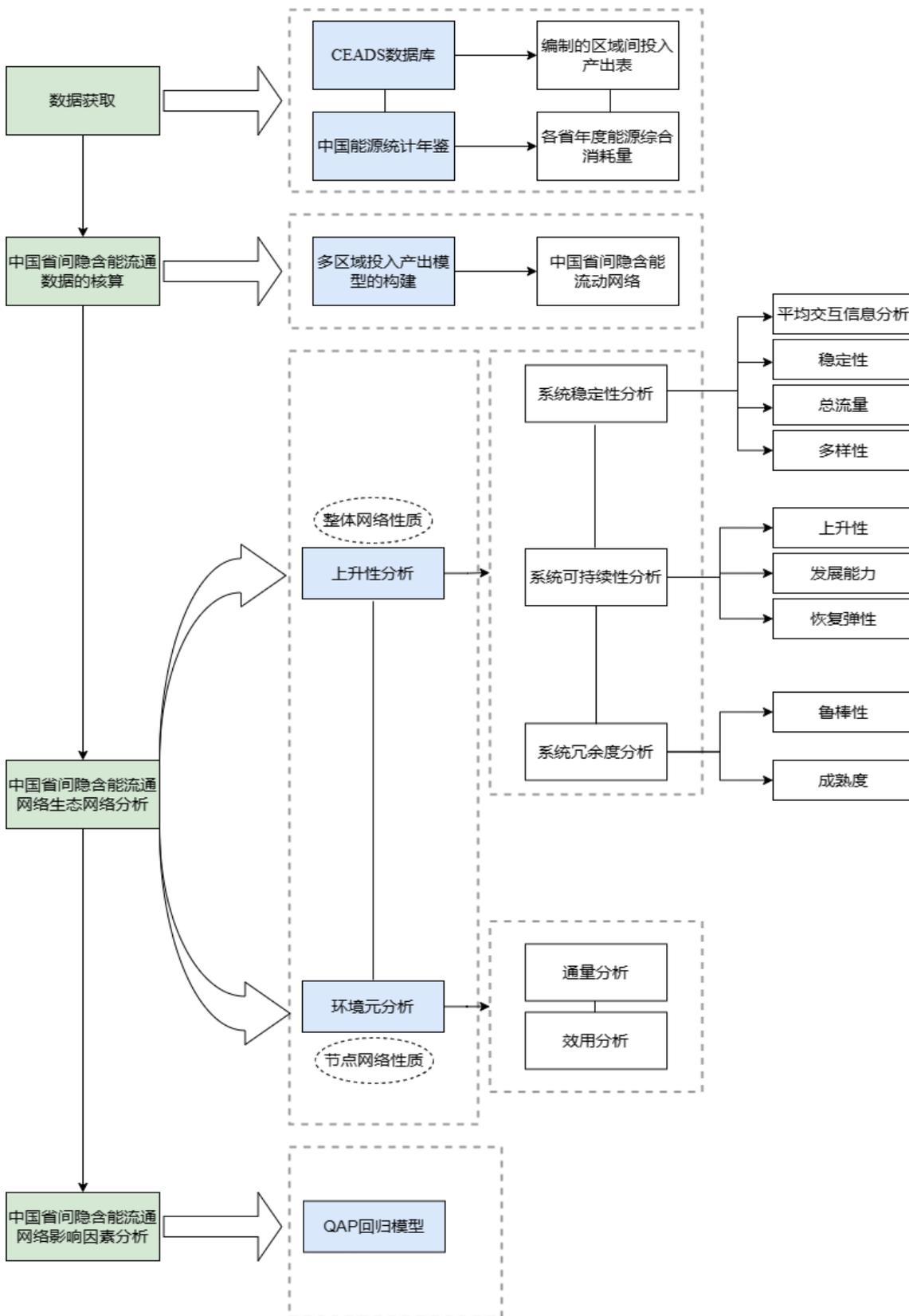


图 1.1 技术路线图

如图 1.1 所示, 本文首先利用 CEADS 数据库获取 2015 年和 2017 年中国省间产业间投入产出表, 利用中国能源统计年鉴和各省统计年鉴计算得到各省 42 部门的能源消耗量; 其次采用多区域投入产出模型计算得到中国省间隐含能流通网络数据, 再基于生态网络模型对流通网络进行上升性整体分析与环境元节点分析, 最后利用 QAP 回归模型对中国省间隐含能流通网络进行影响因素分析。

1.4 本文创新之处

(1) 本文选择总流量 (TST)、平均交互信息 (AMI)、系统稳定性 (S)、系统稳健性 (SR)、系统上升性 (A)、系统发展能力 (C) 和恢复弹性 (R) 七大指标来对 2015 年和 2017 年中国省间隐含能流通系统进行上升性分析; 选择通量分析和效用分析来进行环境元分析。以更加全面的指标对中国省间隐含能流通网络进行详细的上升性与环境元分析, 对流通系统的网络特征剖析深入而又细化, 为优化国内贸易隐含能流通格局提供了相关科学依据。

(2) 本文在网络特征分析之后加以延伸, 考虑到网络数据的特殊性与适用性, 采用以矩阵数据置换为基础的 QAP 模型对 2015 年和 2017 年中国省间隐含能流通网络进行影响因素对比分析。在以往选用了 QAP 回归模型的能源贸易研究中, 大多是基于地区间或国家间的真实能源网络, 例如煤炭、石油、天然气等, 少有对国内隐含能流通网络进行影响因素分析。本文研究深入探索了隐含能流通格局背后的影响因素, 为健康化省间隐含能流通网络提供了方向, 也丰富了现有文献。

2 理论基础与研究方法

2.1 理论基础

2.1.1 隐含能概念

1974年国际高级研究机构联合会(IFIAS)能源分析工作组在一次会议中明确提出“embodied”概念,并用其代表在生产贸易商品或服务的过程中所消耗的直接和间接资源。1980年,为定义附着在产品和服务生产消费过程中间接和直接消耗的能源,进一步分析能源从“出生到死亡”全过程的相对关系(Bullard和Herendeen, 1973),学者们开始探究隐含能源(Embodied energy)的概念及测算(Costanza, 1980)。陈锡康(1981)提出产品和服务生产消费过程中间接和直接消耗的能源即为隐含能,其中生产商品需消耗各部门相应的产品(基础原料、辅助材料、生产设备等),利用这些产品生产商品过程中产生的能源之和称为间接消耗能源。此后也有学者提出其他概念,如周志田等(2006)和王雪艳等(2020)将其称为“虚拟能”,刘峰(2007)称其为“隐性能源”。相对于直接测度的能源消耗量,隐含能源的测算要从生产侧与消费侧双视角出发,涵盖整个产业链的实际能源消耗,包括产品生产与加工、运输与销售(公丕芹等;2013),隐含能源也可表述为伴随在商品及服务供给消费下的能源消耗,会随着贸易往来而在国内及国际间流动。通过对隐含能流动的测算,可将地区的能源消耗分为完全能源需求以及直接能源需求,其中完全能源需求是指地区各产业最终消费的能源量,直接消耗能源是指地方可直接消耗利用的能源量(申俊等,2016)。

2.1.2 投入产出理论

1936年瓦西里·里昂惕夫(Wassily Leontief)创新性地提出投入产出(Input-Output)理论及模型,1941年详细阐述了投入产出分析法原理及分析过程。作为数量经济分析奠基理论之一,实际上投入产出分析是通过编制的矩阵表从生产投入和最终需求两方面来描述国家间、地区间各部门产品或是单纯部门间产品按比例相互流动,进而计算出商品的价值(Leontief, 1941)。同时通过计算各部门总投入、中间使用以及最终消费间的投入产出参数,也可对各经济部门的关联

关系进行量化分析（郭珊等，2021）。投入产出中的“投入”指生产商品过程中损耗的基础材料、辅助材料、机器设备折旧以及劳动力资源；“产出”指商品生产完成后的消费与再利用。而投入产出模型主要用于计算经济系统中各分部之间相互投入成本及产出经济的数量关系，国际投入产出模型中各分部表示为各个国家，地区间的投入产出模型中各分部表示为各个地区，单区域的投入产出模型中各分部表示为各个部门。依据投入产出均衡原理编制的投入产出表，可用于表示经济系统中各分部之间直接和间接的流通关系（Leontief, 1986）、宏观经济层面的资本流动和居民收入结构（Dorfman 等，1958）。如今投入产出分析应用在多个领域，不仅用于核算经济系统，还融入了资源、能源、水等物质流动分析（檀勤良等，2021；邓光耀和陈荟荟，2022；项潇智等，2022；韩梦瑶等，2022）。

2.1.3 生态网络分析

生态网络分析作为系统分析方法的重要分支，起源于生态环境学，立足于生物关系网模拟原理，原用于剖析生态系统内部的生物生态关系、物质流动关系对整体系统的影响，探究生态系统的运行规律，剖析系统中各分室在各路径上传输物质或能量的整体网络属性（Fath 等，1999），其中各功能单位被叫做分室，分室之间相互传输能量、物质的通道叫做路径。生态网络分析主要分为基于信息理论，来评价系统内部物质或能量整体流通网络特征的“上升性分析”和基于生态网络分室间流量分布特征，来评估网络内部的结构分布特征及功能作用关系的“环境元分析”两大分支。1973年 Hanno 首次将投入产出法用于生态系统中构建物质、能量流通网络，生态网络分析法初次形成。1976年，Patten 等（1976）率先开展了生态网络流量分析研究，生态网络分析方法正式形成，基于此方法可定量检测生态系统中物质的网络流动路径和数据以及节点间的生态关系，从而更清晰地展示系统各功能的运转及影响，此后部分学者开始用此方法剖析生态系统网络化的整体特征与节点间物质流动特性（Szyrmer, 1987; Patten, 1982）。

2.2 研究方法

2.2.1 多区域投入产出模型

投入产出模型是一组反映国民经济核算平衡的方程，主要用于研究经济活动投入和产出之间的数量关系，能够很好地反映各个产业部门之间的相互联系。省间跨产业投入产出表是一种非竞争性投入产出表，它对一个省份各部门所消耗的国内产品和进口产品进行了明确的区分，同时详细地提供了各省份部门进出口产品的来源和使用去向，能够反映国内省间贸易活动带来的影响。表格水平方向反映了各省份各部门的中间使用、最终使用和总产出；垂直方向反映了各省份各部门的中间投入、增加值与总投入。

表 2.1 中国多区域投入产出表结构

	中间使用					最终需求				总产出
	1	2	...	G	1	2	...	G		
中	1	Z^{11}	Z^{12}	...	Z^{1g}	Y^{11}	Y^{12}	...	Y^{1g}	X^1
间	2	Z^{21}	Z^{22}	...	Z^{2g}	Y^{21}	Y^{22}	...	Y^{2g}	X^1
投	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
入	G	Z^{g1}	Z^{g2}	...	Z^{gg}	Y^{g1}	Y^{g1}	...	Y^{gg}	X^g
增加值		V_a^1	V_a^2	...	V_a^s					
总投入		$(x^1)'$	$(x^2)'$...	$(x^g)'$					
能耗量		$(E^1)'$	$(E^2)'$...	$(E^g)'$					

z^{sr} 表示区域s对区域r的N阶中间产品需求方阵； y^{sr} 表示区域s对区域r的N阶最终产品需求列向量，最终消费中包括农村家庭消费、城市家庭消费、政府消费、固定资本形成总额、存货增加； EX^s 为 $N \times 1$ 阶向量，表示区域s在N个部门上的出口量； x^s 为 $N \times 1$ 阶向量，表示区域s在N个部门上的总产出； V_a^s 为 $1 \times N$ 阶向量，表示在N个部门中区域s的增加值； $(x^s)'$ 为 $1 \times N$ 阶向量，表示在N个部门中区域s的总投入； $(E^g)'$ 为 $1 \times N$ 阶向量，表示在N个部门中区域s的能源消耗量。

G个省市N个部门的投入产出模型为：

$$\begin{bmatrix} x^1 \\ x^2 \\ \vdots \\ x^G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^{11} & A^{12} & \dots & A^{1G} \\ A^{21} & A^{22} & \dots & A^{2G} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{G1} & A^{G2} & \dots & A^{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^1 \\ x^2 \\ \vdots \\ x^G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y^1 \\ y^2 \\ \vdots \\ y^G \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, A^{sr} 为区域 s 对区域 r 的 N 阶中间需求系数矩阵; $y^s = \sum_{r=1}^G y^{sr}$ 为 $N \times 1$ 阶向量, 表示区域 s 的 N 个部门最终需求, 而 A^{sr} 可由公式 (2) 计算可得

$$\begin{bmatrix} A^{11} & A^{12} & \dots & A^{1G} \\ A^{21} & A^{22} & \dots & A^{2G} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{G1} & A^{G2} & \dots & A^{GG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^{11} & Z^{12} & \dots & Z^{1g} \\ Z^{21} & Z^{22} & \dots & Z^{2g} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z^{g1} & Z^{g2} & \dots & Z^{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{x^1} \\ \frac{1}{x^2} \\ \vdots \\ \frac{1}{x^g} \end{bmatrix} \quad (2)$$

通过变换公式 (1) 可得

$$\begin{bmatrix} x^1 \\ x^2 \\ \vdots \\ x^G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B^{11} & B^{12} & \dots & B^{1G} \\ B^{21} & B^{22} & \dots & B^{2G} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B^{G1} & B^{G2} & \dots & B^{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y^1 \\ y^2 \\ \vdots \\ y^G \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中

$$B = \begin{bmatrix} B^{11} & B^{12} & \dots & B^{1G} \\ B^{21} & B^{22} & \dots & B^{2G} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B^{G1} & B^{G2} & \dots & B^{GG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I - A^{11} & -A^{12} & \dots & -A^{1G} \\ -A^{21} & I - A^{22} & \dots & -A^{2G} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -A^{G1} & -A^{G2} & \dots & I - A^{GG} \end{bmatrix}^{-1} \quad (4)$$

B 为 GN 阶列昂惕夫逆矩阵, 表示由区域 r 最终产出引起的区域 s 总产出。

公式 (3) 两边同乘以各区域能源消耗量 E , 由此可得区域间隐含能流通模型为:

$$\begin{bmatrix} EE^{11} & EE^{12} & \dots & EE^{1G} \\ EE^{21} & EE^{22} & \dots & EE^{2G} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ EE^{G1} & EE^{G2} & \dots & EE^{GG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E^1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & E^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & E^G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{x^1} \\ \frac{1}{x^2} \\ \vdots \\ \frac{1}{x^g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I - A^{11} & -A^{12} & \dots & -A^{1G} \\ -A^{21} & I - A^{22} & \dots & -A^{2G} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -A^{G1} & -A^{G2} & \dots & I - A^{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y^1 \\ y^2 \\ \vdots \\ y^G \end{bmatrix}^{-1} \quad (5)$$

其中 EE^{sr} 表示从区域 r 流入到区域 s 的隐含能耗量, E^s 表示区域 s 的能源消耗量。

2.2.2 生态网络分析

利用多区域投入产模型可计算得到省间隐含能流通的绝对量，但无法解释各省因隐含能流通所产生的关联效应以及对整个系统的影响。要想深入探究中国省际层面的隐含能流通情况，既要科学计算各省之间的流通数量，也要考虑区间隐含能流通的网络特征以及对系统产生的影响。因此，通过构建生态网络分析模型，将中国作为一个生态系统进行分析，可以得到系统中各个节点（省份）之间隐含碳流动的生态关系，以及对整个系统带来的影响。

在省间隐含能流通生态网络分析中，直接隐含能源流动 f_{ij} 表示从节点 j 流入到节点 i 的隐含能耗量， T_i 表示流入节点 i 的总直接隐含能源量。无量纲直接能源强度矩阵为 $G = (g_{ij}) = f_{ij}/T_i$ 。整体流动强度矩阵为 $N = (n_{ij}) = (G)^0 + (G)^1 + (G)^2 \dots = (I - G)^{-1}$ ， N 代表各节点间传输路径的无单位总体能源流动强度， n_{ij} 则表示 g_{ij} 的含量纲价值量， I 表示单位矩阵，其中 $(G)^0$ 代表自反馈矩阵中流通起点和终点都是同一节点的能源流入量，流通距离为0， $(G)^1$ 代表流通距离为1的各节点能源流入量， $(G)^2$ 代表流通距离为2的各节点能源流入量，以此类推，且 $(I - G)$ 为可逆矩阵。 n 为系统中组分的数量（组分1, 2, ..., n ），第0个组分表示系统的输入，第 $n + 1$ 个组分表示系统的有效输出，第 $n + 2$ 个组分表示系统的耗散。

2.2.2.1 上升性分析

上升性理论原用于生物学中辨识生态系统的稳健性与发展能力，通过计算网络特征数据来评价系统的整体发展状况。如今在不断发展进化的资源流动经济系统中，上升性理论被用于衡量系统的发展能力和网络效率本研究选择总流量TST、平均交互信息（AMI）、系统稳定性（S）、系统稳健性（SR）、系统上升性（A）、系统发展能力（C）和恢复弹性（R）七大指标来定量评估系统发展程度，在此基础上对中国省间隐含能流通系统进行稳定性、可持续性和冗余度分析。

1. 系统稳定性分析

总流量（TST），用于表示在流通系统中资源在各节点间的总体流动数量，通过计算该指标的数据，可精确量化流通系统中相互传输的资源总量，进而刻画系统的规模大小。

$$TST = \sum_{j=1}^n T_j = \sum_{i=1}^n T_i \quad (6)$$

平均交互信息 (AMI), 用于评估流通网络中各节点相互交换物质或资源的平均限制程度, 因此网络系统的物质交换越完善, 指标的数值就越低 (Ulanowicz, 1986)。由于本文已将对数函数的底数设置为 2, 相应地, 作为信息变量单位的 k 也被定为 1 比特(Bit)。

$$AMI = k \sum_{i=1}^{n+2} \sum_{j=0}^n \left(\frac{f_{ij}}{T} \right) \log_2 \left(\frac{f_{ij}T}{T_i T_j} \right) \quad (7)$$

系统稳定性 (S), 用于衡量系统面对外界冲击的防御能力。 H_R 表示系统应对变化的总体能力, 也被称为多样性。

$$H_R = - \sum_{j=1}^n \left(\frac{T_j}{T} \right) \log_2 \left(\frac{T_j}{T} \right) \quad (8)$$

$$S = H_R - AMI \quad (9)$$

2. 系统可持续性分析

系统上升性 (网络结构效率, A), 量化系统的规模和反馈, 描述系统的发展程度。

$$A = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f_{ij} \log_2 \left(\frac{f_{ij}T}{T_i T_j} \right) \quad (10)$$

系统发展能力 (系统发展容量, C), 系统发展的最大潜力, 系统发展能力指数是系统上升性值的上界。利用系统的发展能力指数与上升性指数可得到系统的恢复力 (R)

$$C = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f_{ij} \log_2 \frac{f_{ij}}{T} \quad (11)$$

$$R = C - A \quad (12)$$

从公式来看, 上升性 (A) 和恢复弹性 (R) 始终都是处于对立关系, 在系统不断演化的过程中, 上升性与恢复弹性会将系统效率拉向不同的方向, 上升性数值升高, 表明系统效率在不断上升, 恢复弹性数值升高, 则表明系统效率在不断下降。

3. 系统冗余度分析

SR 是系统稳健性函数, 又称系统鲁棒性, 用来检测系统里物质的流动效率及冗余程度。SR 计算过程如下:

$$SR = -\alpha \ln \alpha \quad (13)$$

$$\alpha = A/C \quad (14)$$

根据 Baird 等的研究理论, 随着生态系统内部节点间物质传输功能的成熟和稳

定, 即自运行能力与物质传输、转换能力的增强, α 的数值也会不断增大 (Baird 等, 1991)。Ulanowicz 等 (2009) 研究发现自然生态系统可持续发展的最佳平衡点是 α 为 0.4596。但隐含能流通系统属于社会经济系统, 包含人工因素的经济社会网络远比仅有食物链结构的自然生态系统要复杂很多。从流通方向来看, 经济系统中存在分部间资源或物质的双向流通, 而自然生态系统只存在鹰吃兔、鸟吃虫的单向路径。因此针对经济系统而言, α 的最佳定值存在较多讨论, Morris 等 (2005) 认为拥有较多权重的随机网络稳定子集是 $1/e$ 的渐近线, 因此 α 的最佳值应定在 0.37; 而 Lietaer 等 (2009) 则提出拥有众多流通路径的复杂网络在最佳状态下, 其网络效率约是系统恢复弹力的一半, 因此 α 的最佳值应定在 0.33。

2.2.2.2 环境元分析

环境元分析是从流通网络内部节点的角度出发, 一方面使用通量分析数值化网络内节点间相互流通的直接流量和间接流量, 从而确定各节点的流通贡献度, 另一方面使用效用分析对节点间形成的生态关系及系统影响进行深入解析, 辨别出节点间的互惠关系和控制程度。

1. 通量分析, 量化各节点之间的资源流通贡献度。

$$Y = \text{diag}(T) \times G \quad (15)$$

$$W = \sum_{i=1}^n y_{ij} / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad (16)$$

通过代入流量密度矩阵 G 可计算省份之间经过不同距离路径流通的综合流量矩阵。列向量 $Y = \sum_{i=1}^n y_{ij}$ 表示各节点资源的整体流出 (Zhang 等, 2014)。 W 可以反映出各节点对整个系统的贡献情况, 从而得到每个节点的贡献并以此确定每个节点的比重。

2. 效用分析, 识别节点间的生态关系及其对系统的整体影响。

$$U = (I - D)^{-1} \quad (17)$$

使用直接能源流动无量纲化整合效应矩阵 $\text{Sign } U = (u_{ij}) = (D)^0 + (D)^1 \dots = (1 - D)^{-1}$, 其中 $D = (d_{ij}) = (f_{ij} - f_{ji}) / T_i$, T_i 中间成分流入部门 i 的总和。在效应矩阵中, 通过元素 u_{ij} 的正负组合去判定两个节点的生态关系: (+, -) 控制关系, 表示在节点 1 与节点 2 的生态关系中, 节点 1 拥有控制权; (-, +) 被控制关系; 表

示节点 2 拥有控制权；(-, -) 竞争关系, 表示节点 1 与节点 2 在相互竞争, 争夺资源, 两者关系会对系统产生消极影响；(+, +) 互惠关系, 表示节点 1 与节点 2 互惠互利、共同发展, 两者关系会对系统产生积极影响。另外, 若是矩阵中出现 u_{ij} 为 (0, 0), 则表示节点 1 与节点 2 之间存在中性关系, 这种关系对整个流通系统不产生影响。

2.2.3 QAP 回归分析

由于本文的变量均为网络矩阵型数据, 数据间存在难以弱化的关联性, 套用常规的回归模型会出现严重的多重共线性。QAP 回归模型是一种二次指派程序, 专用于构建矩阵数据的影响因素模型。首先将两个矩阵之间的各因素进行相似性对比, 计算二者的相关系数, 接着随机置换其中一个矩阵的行和列, 再次检验置换后的矩阵与另一矩阵的相关性, 并计算相关系数, 将此步骤重复多次得到相关系数分布, 最后对比计算出来的相关系数分布矩阵与随机重排计算出来的相关系数分布矩阵, 进行假设检验判断, 利用显著性水平 0.05 判定两个矩阵是否存在强关系。因此选择以矩阵数据置换为基础的 QAP 模型, 通过随机转置被解释变量的行列数据可以更好的建立影响因素回归模型。

2.2.4 数据来源

本文中 2015 年和 2017 年的区域间投入产出表均来自于 CEADs 数据库。而计算中涉及到的 30 个省份能源数据来自 2015 年和 2017 年《中国能源统计年鉴》和各省份统计年鉴。数据涉及到《中国能源统计年鉴》中 30 省的年度能源综合消费量、各省份统计年鉴中分行业分能源种类的能源消耗数据以及年度综合能源平衡表。

由于部分省份统计年鉴提供的分行业分能源种类的能源消耗表中, 各种类能源单位不一, 因此为计算 2015 年、2017 年各省 42 部门的隐含能消耗量, 首先需要将不同种类的能源的消耗量单位折算为万吨标准煤。本文查阅国家能源统计年鉴确定了各种类能源折算系数, 如下所示:

表 2.2 各种类能源折算标准煤系数表

能源种类	折算标准煤系数
原煤	0.7134 千克标准煤/千克
洗精煤	0.9000 千克标准煤/千克
焦炭	0.9714 千克标准煤/千克
汽油	1.4714 千克标准煤/千克
煤油	1.4714 千克标准煤/千克
柴油	1.4571 千克标准煤/千克
燃料油	1.4286 千克标准煤/千克
天然气	1.2150 千克标准煤/立方米
液化石油气	1.7143 千克标准煤/千克
焦炉煤气	0.6143 千克标准煤/立方米
电力	0.1229 千克标准煤/千瓦时

由于中国区域间投入产出表包含 42 个部门，但在各省份分行业分能源种类的能源消耗表中未完全给出 42 个部门的能源消耗量，依据陈秀莲和郭家琦（2017）利用各省综合能源平衡表中的第三产业能源消耗量或者其他行业与生活消费的能源消耗量来计算剩余部门能源消耗量：

首先将区域 s 的中间投入数据进行处理，计算 $z_{n \rightarrow i+j}$ ，该元素表示区域 s 的部门 n 提供给电力部门 i 和热力部门 j 的中间产品之和，又已知该区域第三产业能源消耗量为 E_s ；而部门 n 的能源消耗比例 $\varepsilon_n = \frac{z_{n \rightarrow i+j}}{\sum_{n=1}^N z_{n \rightarrow i+j}}$ ，最后计算部门 n 的能源消耗量 $\varepsilon_n \times E_s$ ，由此可计算出所有省份的各部門能源消耗量。由于西藏、香港、台湾和澳门能源数据的缺失，故不包含在此次研究之内。最终得到了 42 部门分类如下：

表 2.3 各省 42 部门分类

投入产出表 42 部门	部门代码	投入产出表 42 部门	部门代码
农林牧渔产品和服务	1	其他制造产品	22
煤炭采选产品	2	金属制品、机械和设备修理服务	23
石油和天然气开采产品	3	电力、热力的生产和供应	24
金属矿采选产品	4	燃气生产和供应	25
非金属矿和其他矿采选产品	5	水的生产和供应	26
食品和烟草	6	建筑	27
纺织品	7	批发和零售	28
纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品	8	交通运输、仓储和邮政	29
木材加工品和家具	9	住宿和餐饮	30
造纸印刷和文教体育用品	10	信息传输、软件和信息技术服务	31
石油、炼焦产品和核燃料加工品	11	金融	32
化学产品	12	房地产	33
非金属矿物制品	13	租赁和商务服务	34
金属冶炼和压延加工品	14	科学研究	35
金属制品	15	技术服务	36
通用设备	16	水利、环境和公共设施管理	37
专用设备	17	居民服务、修理和其他服务	38
交通运输设备	18	教育	39
电气机械和器材	19	卫生和社会工作	40
通信设备、计算机和其他电子设备	20	文化、体育和娱乐	41
仪器仪表	21	公共管理、社会保障和社会组织	42

3 中国省间隐含能流动结果分析

3.1 中国各省隐含能消耗分析

本文利用 Arcgis 软件将 2015 年、2017 年各省的隐含能消耗量进行等级划分，再利用全国地图进行区域等级展示，由此可直观对比出各省隐含能消耗量在国内的层级变动以及数值排名变化，如图 3.1 和图 3.2 所示，具体数值在附录中展示。



图 3.1 2015 年中国大陆 30 省隐含能消耗量地理等级图（空白地区表示无数据）

注：基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2020)4630 号标准地图制作，底图边界无修改



图 3.2 2017 年中国大陆 30 省隐含能消耗量地理等级图（空白地区表示无数据）

注：基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2020)4630 号标准地图制作，底图边界无修改

从图 3.1、3.2 可看出,相比于 2015 年,2017 年各省的隐含能消耗量都有所上升,随着国家及地方经济的发展,省间的商品贸易愈加繁盛,伴随而来的是能源消耗持续上涨。从消耗量重心分布可发现,2015 年省际隐含能消耗重心偏于江苏、浙江、上海和安徽所在的长三角地区,2017 年时,国内的隐含能消耗重心向北边沿海地区转移,京津冀、江苏和浙江地区逐渐成为隐含能重点流出地。长江三角洲拥有高度的经济活跃性、创新能力和开放程度,是中国最好的贸易发展地区之一,地区吸收了较多的国内产品生产加工活动,因此该地区的隐含能源消耗量也较高。2017 年,安徽与上海的消耗等级下降,与江苏、浙江两省形成差距,但与邻近的湖北、江西两省同步变化,由此看出长三角经济带的联动效应下降,地区发展步调不一;而京津冀地区以首都为圆心,以虹吸现象带动地区一体化发展,由于该地区发展较早、水平较高,因此有足够的运营资本以及高新生产技术来承接大量的贸易活动,因此该地区的隐含能消耗量也随着贸易深度增加。

东北地区中吉林和辽宁的隐含能消耗量大幅下降,但黑龙江省却显著上升。东北三省是中国老牌工业基地,属于工业活动密集的资源型城市,但随着国家整体工业占比的调整,东北三省难以长期支撑资源型工业生产活动,为建设可持续发展经济道路,各省都在积极寻求经济转型,降低能源消耗,但相比于吉林与辽宁省,黑龙江省的技术水平较低、资源配置能力较差,难以适应当前城市快速扩张的节奏,城市发展资本供应不足,能源消耗反而会持续增加(韩刚和袁家冬,2017)。

海南和福建两省虽与广东、浙江同处于沿海地区,但地区发展步调存在异质性,广东、浙江凭借着国际贸易优势,早已在国内省间贸易中掌控了上游尖端产业,因此贸易隐含能消耗量与地区生产总值呈现出同向增长态势;福建、海南虽邻近一线城市,但也因历史遗留的经济差距而受到了周边地区的“资源抢夺”,科技发展水平和人才集聚能力都低于他省,使得两省无法成为规模贸易的承载地,而沿海的地理位置更使两省无法成为国内贸易的集散地,因而两省的隐含能消耗量一直处于沿海地区,乃至国内各省中的低档水平。

西南、西北两地在省际层面中消耗量最低,常居于省级隐含能消耗量的低层。这些省份占据了我国较多的领土与资源,但省份产业结构与生产技术存在不协调发展,这些地区中工业型城市占比较多,地区虽意在增加其在省间贸易链的参与度,但落后的生产技术难以支撑工业规模化、科技化的生产方式,其他省份可能

会选择生产技术较好、贸易集散度较高的中部地区，因此湖南、湖北、山西、河南等地的隐含能消耗水平会略高于周边的西南、西北地区。

3.2 中国各省隐含能流入流出分析

本文通过区域间投入产出框架计算出 2015 年和 2017 年中国省间隐含能流动数据，图 3.3 为各省 2015 年和 2017 年的隐含能净流出值对比图，以此展示各省隐含能净流出值在两年间的纵向数值变化以及省际横向对比情况，具体数据在附录中展示。

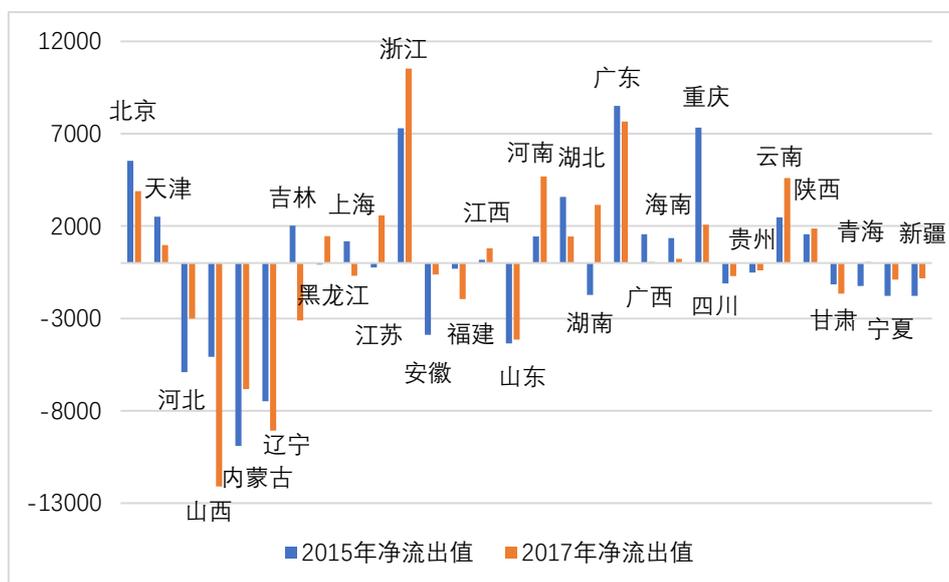


图 3.3 2015 年和 2017 年中国大陆 30 省隐含能净流出值对比

从图 3.3 中可看出，在京津冀城市带的北京、天津都处于隐含能净流出值下降状态，而河北虽为隐含能净流入省份，两年时间里隐含能净流入值下降了近 3000 万吨标准煤，山东省的隐含能净流入值下降幅度稍小，总体变化趋势相同；京津冀城市群推行区域经济-能源协同发展政策，各省的经济发展与贸易进程较为一致，山东与京津冀城市群共处北部沿海地区，能源发展状态较为一致。西南五省中重庆、广西、云南一直属于隐含能净流出省份，但除云南外其余两省的净流出值大幅下降，四川和贵州则属于隐含能净流入省份；四川和贵州两省依靠他省调入的产品较多，重庆、广西和云南在国内贸易中更偏向于生产加工产品的角色，更多的参与到了中间产品的加工运输过程。

隶属于西北地区的甘肃、青海、宁夏、新疆一直是隐含能净流入省份；西部

地区的省份经济发展相对落后，商品及服务的生产供应能力较低，虽拥有较多的能源矿藏，但也因为自身贸易能力与生产技术的落后，各省将众多的贸易活动及其隐含的能源消耗大多都转向了外省。上海、江苏和浙江都属于沿海发达地区，其中上海和江苏的状态互为相反，前者是由隐含能净流出省份转为隐含能净流入省份，后者则是由隐含能净流入省份转为隐含能净流出省份；浙江省一直都是隐含能净流出大省，在 2015 年以 7301.53 万吨标准煤的隐含能净流出值位居大陆省份第二，2017 年则以 10528.51 万吨位居大陆省份第一，三省都属于经济发达、贸易繁盛的省份，但上海市已转变贸易策略，偏向于将能耗生产活动转移至外省，而浙江与江苏则偏向于增加国内贸易参与度，在省间贸易链中背负更多的高耗能生产活动，这也意味着两省要承担的节能责任较大。

福建、广东和海南都是南部沿海省份，但发展状况大不相同，海南与广东两省虽都是隐含能净流出省份，但广东的隐含能流出量一直居于高位，在 2015 年时以 8512.74 万吨标准煤占据隐含能净流出量第一位，在 2017 年时以 7653.64 万吨标准煤居于第二位，而海南省的隐含能净流出值逐渐下降，在 2017 年时已下降至 221.97 万吨，福建则处于隐含能净流入值上升状态。三省虽都拥有沿海位置优势，可利用国际进出口贸易合作来提高自身贸易承载力，但相比于较早发展经济贸易活动的广东省，海南与福建两省的发展脚步较慢，参与国内贸易活动的深度不够，因而两省的隐含能流入流出值都较低；唯有广东省凭借繁盛的贸易活动逐渐占据了国内能耗高位，需承担较多的节能责任。黄河中游地区包括山西、陕西、河南和内蒙古，陕西、河南均为隐含能净流出省份，且数值都在上升，而山西和内蒙古都属于隐含能净流入值较高的省份；该地区各省份都拥有丰富的能源储备，虽有黄河经济带的政策联动效应，四省的发展步调也不尽相同，陕西和河南两省的隐含能流动量较高，国内贸易承接活动较多，而陕西与内蒙古两省则是将贸易生产活动移向他省，进而转移节能责任。

长江中游地区包括湖北、湖南、江西和安徽，其中安徽省的隐含能流出、流入值都在大幅下降，且整体处于隐含能净流入状态，证明该省在贸易活动上的能源消耗显著减少；湖北与江西两省均为隐含能净流出省份，2017 年时两省的本地隐含能消耗量较低，在省间贸易中占比相对偏低；湖南省则是由隐含能净流入状态转为净流出；总体而言，长江中游地区的省份隐含能流出量与流入量都在下降，各地节能减能措施已见成效。黑龙江、吉林、辽宁三地，相比于 2015 年，2017 年

辽宁与吉林的隐含能流入、流出比例变化相同，净流入值都有显著增加，而黑龙江省则是由隐含能净流入性质转为净流出，且该省在国内贸易能源交互活动中日渐活跃，隐含能流动量增加。

总体看来，中国各个省份间经济及技术发展不均衡，能源丰富但中等发达地区在国内整体产业结构中主要承担原材料的供给以及初级产品的生产，偏于调出隐含能源。同时相对发达的省份会从这些地区调入隐含能，这些省份承担着经济发展和环境保护的双层责任。在分配省际层面的节能目标时，需要考虑中国各个省份的多样性和复杂性，提出较为均衡的节能责任划分方案。从全国总体产品流动的视角考虑隐含能消耗问题，尽可能缩小发达省份与欠发达省份之间的能源利用效率等科技的差距，从而高效的降低整体减能的成本。

3.3 中国各省隐含能往来分析

本文将多区域投入产出模型与省间能源消耗数据相结合，计算得到省际隐含能流动数据，图 3.4、图 3.5 分别为 2015 年和 2017 年中国省间隐含能流动数据和弦图，图中连接各省之间的线条粗细代表各省之间隐含能流动数值的大小。

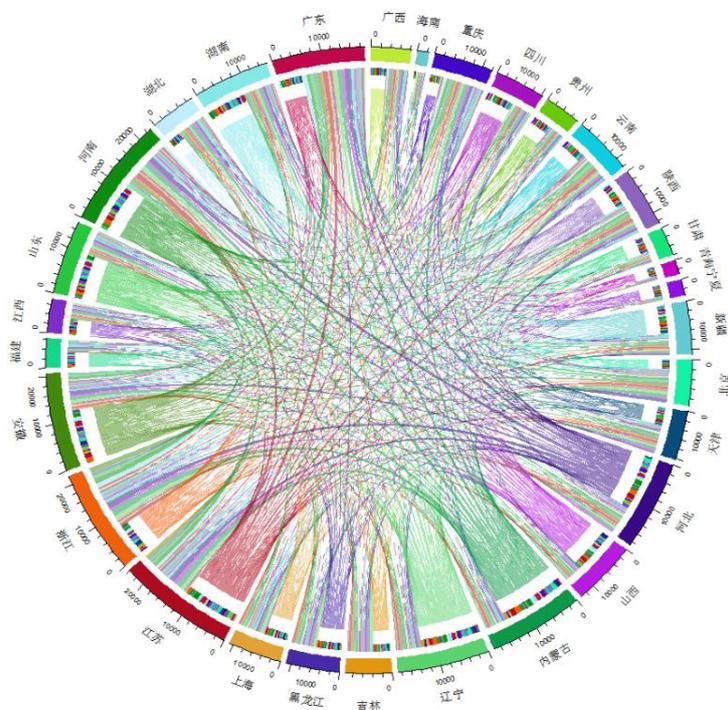


图 3.4 2015 年大陆 30 省的省间隐含能源流动（单位：万吨标准煤；圆弧的长度表示一个省份总的进出口隐含能消耗量；不同的颜色表示不同的省份。）

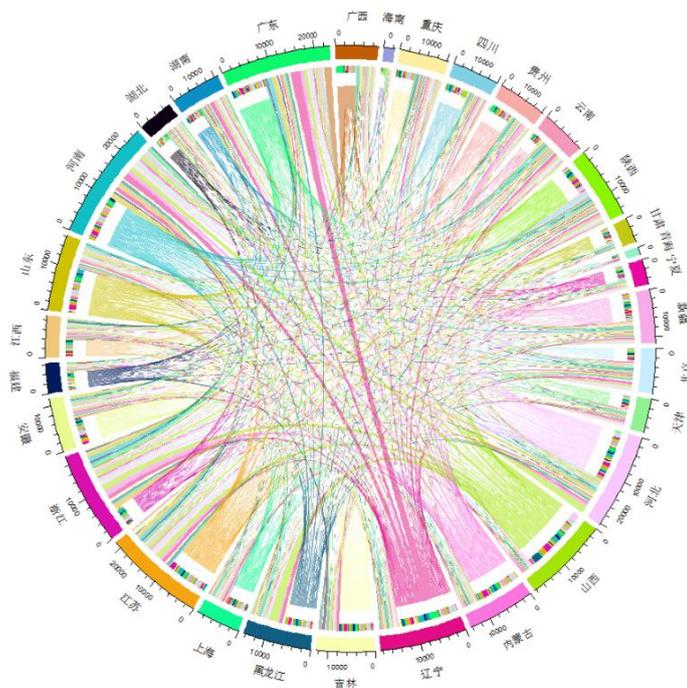


图 3.5 2017 年大陆 30 省的省间隐含能源流动（单位：万吨标准煤；圆弧的长度表示一个省份总的进出口隐含能消耗量；不同的颜色表示不同的省份。）

由图 3.4、3.5 观察可知，从隐含能流转重心来看，长江中游与黄河中游地区的省份在国内贸易隐含能往来中占据了较多份额，隐含能流动数值较高；南部沿海地区、西北地区的隐含能总体流动数值及占比都偏低；北部沿海地区、西南地区的隐含能流动数值及占比都略有下降。从隐含能消耗重心来看，隐含能流入流出较多的省份大多都在我国工业地区，例如江苏、浙江、广东等等，同时国内的能源资源大省也调出了较多的隐含能源。出现这种现象的主要原因就在于各省份的经济基础、资源禀赋及地理位置不同，因而所处的贸易发展进程及能源发展战略制定也不相同。

从隐含能流出量数据来看，浙江、广东、江苏的隐含能流出值一直居于前列，这些经济科技发展相对发达的省份在国内贸易中承担中间产品提供者的角色也相对较多，为满足他省的中间产品需求，这些省份在中间品的生产中消耗了大量的能源。其中山西、内蒙古及江苏向浙江调出了大量的隐含能源，2017 年浙江省约 24.23% 的隐含能消耗量都是因这三省而产生，因此这些省份应分担一部分浙江省的节能责任；而在广东省的隐含能流出量数据中不难发现，该省在为辽宁、山东和广西三地提供商品及服务中消耗了大量的能源，2017 年辽宁省向广东省调出的隐含能源量最高，占广东省隐含能消耗量的 14% 之多；在江苏省的隐含能流出量

数据中可发现，江苏对安徽、山西跟河北的隐含能调入量都较高，其中 2017 年山西省以 1293.04 万吨位居江苏隐含能调入量第一位。福建、甘肃、海南、青海和宁夏一直处于隐含能流出值中省份排名低位，福建与海南虽处于南部沿海地区，但其在省间的贸易份额相对较低，因而隐含能调出调入份额也较低，而甘肃、青海和宁夏位于我国西北偏远地区，经济发展落后、常处于国内贸易链下游，难以满足他省的产品服务需求，因而隐含能流动量一直较低。

从隐含能流入量数据来看，内蒙古、山西、河北和辽宁等这些能源储备量丰富但经济发展偏中游省份的排名较高，这些省份倾向于将产品生产活动移交给经济较发达的浙江、江苏等省份，在省间贸易中未能完全利用自身能源优势。宁夏、青海、海南和北京等地的隐含能流入量在各省中排名靠后，北京作为中国经济发展最好的省份之一，其在省间贸易中的能源交互较少，该省对于贸易隐含能的消耗把控相对严格，整体能源发展势头较好；而宁夏、青海和海南等地的隐含能转移量与其在省间贸易中的参与度紧密相关，这些省份因地理位置及生产技术的限制，致使贸易水平落后，因而其隐含能流出流入值都偏低。

近些年中国整体经济水平快速增长，在规模经济效应的影响下，中国各省经济发展不均衡特点更加突出。从隐含能流通网络动态变化中可看出，各省份隐含能源流通量的增减变化各不相同，但整体消耗量都在增加。国家经济的快速发展是内外部贸易活动繁盛的产物，但同时省际经济发展的不同步会带动贸易能源成本的加速增长。因此这些年国家为统筹地区均衡发展，提出了一系列扶持发展相对落后省份的产业转移整体规划，2007 年中央经济工作将促进东部向中西部地区进行产业转移作为主要任务，自此开启众多形式的产业战略转移活动。但在活动中进行转移的多数产业是能源密集型产业或中间品加工产业，这也导致了部分省份的直接能源与隐含能源消耗与流出加剧。同时，这些欠发达地区的平均生产技术水平较为落后，生产加工活动带来的能源成本较高，但为了满足他省服务需求不得不持续维持其高能耗产业的生产。总体而言，各省份的经济不均衡发展导致欠发达地区多向较发达地区调出隐含能，使得欠发达地区的环境保护压力及节能责任日益增长。因此在划分能耗责任时，既要考虑直接能源消耗责任，也要考虑隐含能源流通附带的转移责任。

4 中国省间隐含能流动生态网络分析

生态网络分析基于投入产出模型所建立，用于模拟一个系统内部各个元素流动以及其流动影响。多区域投入产出分析能够高效的核算出各个省份间的贸易和隐含能流动情况，并主要集中在对任意两个区域（部门）联系的核算。但隐含能流动数据只能用来研究隐含能在消费端的利用情况，用于界定流动消费者的责任，并不能直接判断这样的流动是否对中国整体隐含能消费有益或者有害，且不能对各个省份间的流动对整体的影响进行分析。为了了解隐含能流动所带来的影响，从系统的角度思考系统内部的流动情况，我们引入了生态网络分析模型。

以各省为节点，省间的隐含能贸易关系为边，构建 30 个省市自治区的隐含能流通关系网络模型，记为 E ，并作如下定义：

$$E = (N, P) \quad (18)$$

式(18)中， N 表示网络中所有节点（省市自治区）的集合； P 表示网络中各节点之间的连线（省间的隐含能贸易联系）。本文采用软件 Ucinet 6 对中国省间隐含能流通网络进行可视化表达（见图 4.1），30 个节点表示中国大陆参与隐含能贸易的 30 个省份，连线代表隐含能流通关系存在，连线箭头由流出省指向流入省，以下是利用 Ucinet 6 软件绘制得到的中国省间隐含能流通网络结构图：

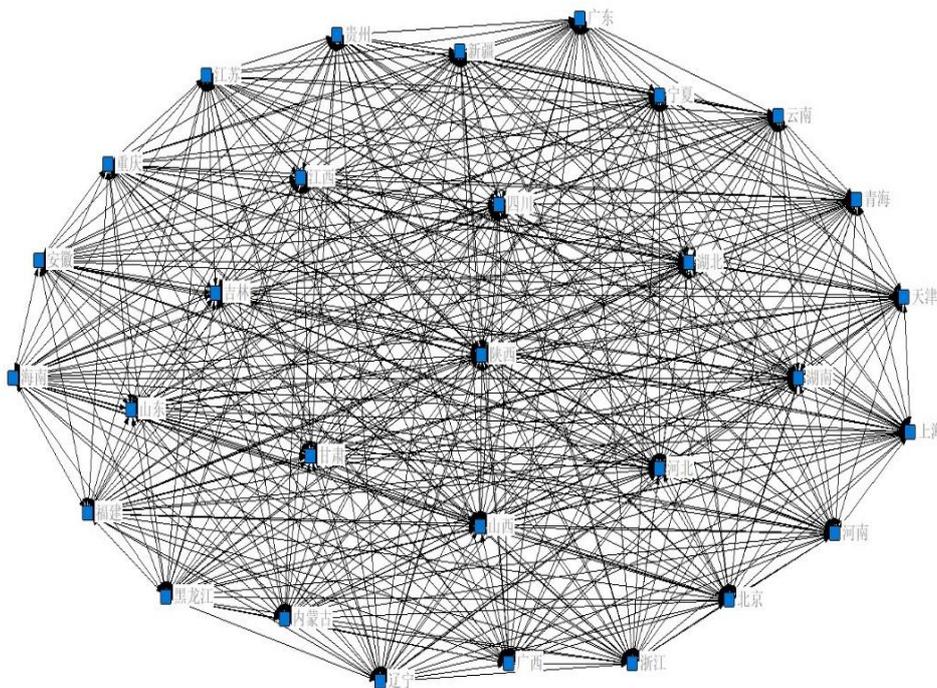


图 4.1 中国省间隐含能流通网络结构

4.1 上升性分析

4.1.1 系统稳定性分析

H_R 为系统的多样性指数， AMI 为系统的平均相互信息， S 为系统的稳定性。根据对数函数的凸性可知， $H_R \geq AMI \geq 0$ ，即多样性指数是平均相互信息的上限。表 4.1 为 2015 年和 2017 年中国省间隐含能流通系统的稳定性指标情况汇总。

表 4.1 中国省间隐含能流通系统稳定性分析

年份	2015 年	2017 年
多样性指数 H_R (比特)	0.085	0.088
稳定性 S (比特)	0.0216	0.0217
平均相互信息 AMI (比特)	0.063	0.066
总通量 TST (亿吨标准煤)	18.687	18.410

从生态网络分析的角度来看表 4.1 可发现,2017 年的 AMI 值要高于 2015 年,这也意味着系统的信息交互限制和组织能力变高,系统整体处于发展阶段,结构约束不断被强化,隐含能在省间流通会更有效率,但结合隐含能总通量 TST 数据的变化趋势来看,省间贸易隐含能的总流通量在下降,而系统流动效率的提升部分原因也可能是因为其隐含能总体吞吐量的减少,因此流动效率有待进一步提高。系统多样性指数 H_R 以及系统抵抗外界干扰变化的能力 S 都略有上升趋势,表明系统经历变化的能力上升,自身稳定性得到一定的发展。

从两年数据对比来看,省间隐含能流通系统获得了一定的发展,且系统总体隐含能流通量处于下降状态,因此预计未来中国省间隐含能交互系统的流通效率增长趋势会更加明显,系统发展更加稳定。

4.1.2 系统可持续性分析

本文对流通网络的可持续性检测主要通过考察系统在现有条件下实现其发展目标的能力（发展能力 C）、系统内各节点省份的相互连接倾向性（上升性 A）、系统在经历外部扰动后恢复到稳定状态的能力（恢复弹力 R）这三个指标，各指标情况如表 4.2 所示。

表 4.2 中国省间隐含能流通系统可持续性分析

年份	2015 年	2017 年
上升性 A（亿吨标准煤·比特）	341.120	354.789
发展能力 C（亿吨标准煤·比特）	582.630	592.299
恢复弹力 R（亿吨标准煤·比特）	241.510	237.510

由表 4.2 中数据可发现，中国省间隐含能流通系统的上升性 A 和发展能力 C 在增加，根据生态网络理论来看，由于前文计算发现系统总通量下降，意味着网络中的有序部分也会下降，说明系统在总通量减少的情况下，发展效率提升，证明系统结构效率增加是促使系统上升性和发展能力提高的主要原因。系统的恢复弹力 R 则出现下降趋势，表明外界环境对于系统的干扰力度减小(Latham 等, 2002)，因此 R 的计算结果反映了 2015 年至 2017 年流通系统所受到的外界环境压力在逐渐减小，恢复能力也在下降。在中国省间隐含能流通系统中，外界环境对系统的干扰强弱主要由各省市流出量和流入量两方面构成，在前期计算 2015 年和 2017 年中国 30 省隐含能流动量中可发现，中国省间隐含能流通量确实出现了下降态势，各省市（节点）的流出流入量也出现减少态势，进一步验证了该理论。

4.1.3 系统冗余度分析

图 4.2 展示了 2017 年中国省间隐含能流通网络的 α 值与系统稳健性 SR 的函数关系，通过观察 2015 年和 2017 年 SR 与 α 的在函数图形中的坐标位置可判断系统的冗余度情况。

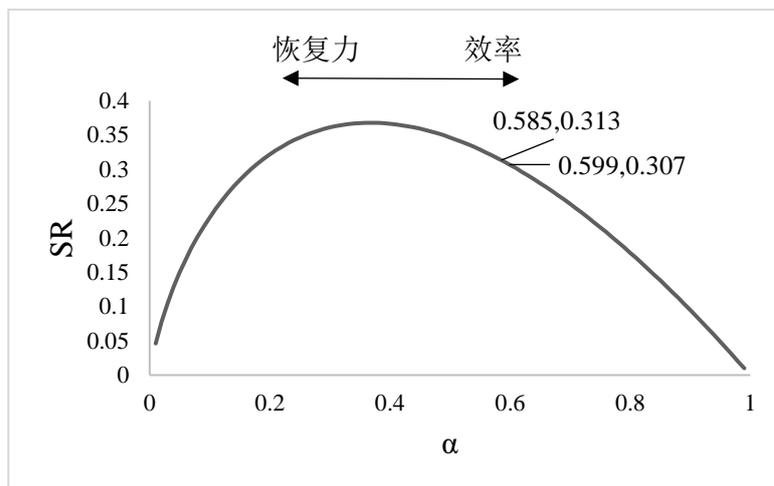


图 4.2 2015 年和 2017 年中国省间隐含能流通系统冗余度

由于 2017 年系统隐含能总流通量要少于 2015 年，如果依据 Baird 的理论，2017 年应比 2015 年的 α 值低 (Baird 等, 1991)，但图 4.2 的数据却显示相反结果。这是因为本文的隐含能流通系统与自然生态系统不同，其包含了社会、经济等要素的影响，因此可能会出现与生态系统相反的结果。

图 4.2 中抛物线上两年的指示点较为靠右，表明系统的效率较高，冗余度较低，但同时系统的脆弱程度也较高。2015 年流通网络的 α 值约为 0.585，2017 年流通网络的 α 值约为 0.599，无论哪一年，中国省间隐含能流通网络系统的成熟度都较高， α 值显著大于理论的最佳平衡点 (0.33)，表明省间隐含能流通网络的上升性较高，但同时存在发展潜力较低的问题。SR 值分别为 0.307、0.313，整体网络偏向于高效率强脆弱的不可持续状态。由此可知，2015 年至 2017 年间中国省间隐含能流通网络系统虽处于有序发展状态，但结构约束过强，冗余度低，系统防御力较弱，一旦外界出现突发干扰因素，整个系统将难以抵抗，甚至会出现崩塌现象。对此需采取措施，适当减少隐含能流动的路径选择，分散隐含能流动受到的约束力。

4.2 环境元分析

4.2.1 通量分析

本文利用中国省间隐含能流通系统的直接流量矩阵计算得到 2015 年、2017 年各节点省份隐含能通量的占比，同时采用 Arcgis 软件将各省的隐含能通量占比进行等级划分，具体数值在附录表格中，等级结果如图 4.3、图 4.4 所示。



图 4.3 2015 年各省通量占比地理等级图（空白地区表示无数据）

注：基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2020)4630 号标准地图制作，底图边界无修改



图 4.4 2017 年各省通量占比地理等级图（空白地区表示无数据）

注：基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2020)4630 号标准地图制作，底图边界无修改

从 2015 年和 2017 年各省隐含能通量占比排名可发现，流通系统中通量重心逐渐明显，江苏、广东、河南、河北以及山东是通量占比大户，且占比数值都在上升，这与高隐含能流出量省份有较多重合；其中广东、河南和江苏三地在 2017 年时占比均超过 10%，江苏和广东两地都属于经济发展较好、贸易结构较为完善的省份，因此在国内贸易系统中参与度较高，隐含能通量较大；而河南、河北及山东三省虽不是经济强省，但三地作为中东部地区的交通枢纽，众多贸易交互路线都需三地作为中转或交接地带，进而带动了潜在能源的流通。在系统中处于流通体系边缘的省份一直是甘肃、宁夏、青海和海南四个省份，通量占比都在 0.5% 以下，这几个省份的经济发展特点较为一致，经济贸易水平偏低、地理优势较弱，无论是作为商品流转地还是贸易承载地都是难以胜任的，因此这些省份在中国省间隐含能流通系统中的通量占比偏低。

结合以上对中国省间隐含能通量的数据分析可以发现，各节点隐含能的系统通量占比与隐含能消耗量的省份排名存在一定同一性，甘肃、青海、宁夏等省份虽在省间隐含能流通系统中处于边缘角色，相应的节能责任也较少，但结合经济、贸易、地理等方面的发展程度来看，这些省份隐含能通量较低的原因在于自身贸易量偏低、商品及服务供给的能源成本较高；通量数值与消耗量数值较高的广东、河南、河北省份是节能的重点区域，在进行贸易隐含能省份责任划分时，这些省份应承担较多责任，加强各产业的能源消耗控制力度，进而再对整体省间隐含能流通网络进行优化建设。

4.2.2 效用分析

由生态网络分析理论可知，生态系统中环节间的原始直接关系只是捕食和被捕食关系，拓展到资源或物质流动经济系统中各节点的关系就是控制与被控制。各节点之间的初始资源或物质通过间接流通使得原本仅有控制与被控制关系的两个节点出现互惠或竞争的生态关系，因此若仅考虑节点间的原始直接流通，不将间接流通纳入研究范围，会有很大可能出现错误的结果。基于此，网络效用分析应运而生，其中整体效用关系是代表网络效用的关键指标，其考虑了流通系统中的直接与间接流通，更能准确反映节点间的真实生态关系。

通过对中国隐含能省间流通系统直接流量矩阵的迭代计算，得到省间隐含能流通系统的无量纲综合效用矩阵 ($Sign U$)，该矩阵是由正号、负号组成的符号矩

阵，两省之间的符号关系由 U_{ij} 表示，由此可反应各省之间隐含能交互的整体效应关系，从而进一步分析各省在系统中的生态关系。图 4.5、4.6 中绿色填充的 (+, +) 表示*i*省与*j*省之间为互惠关系；红色填充的 (+, -) 表示控制关系，*i*省控制着*j*省；黄色填充的 (-, +) 表示被控制关系，*i*省控制着*j*省；蓝色填充的 (-, -) 表示*i*省与*j*省之间为竞争关系。

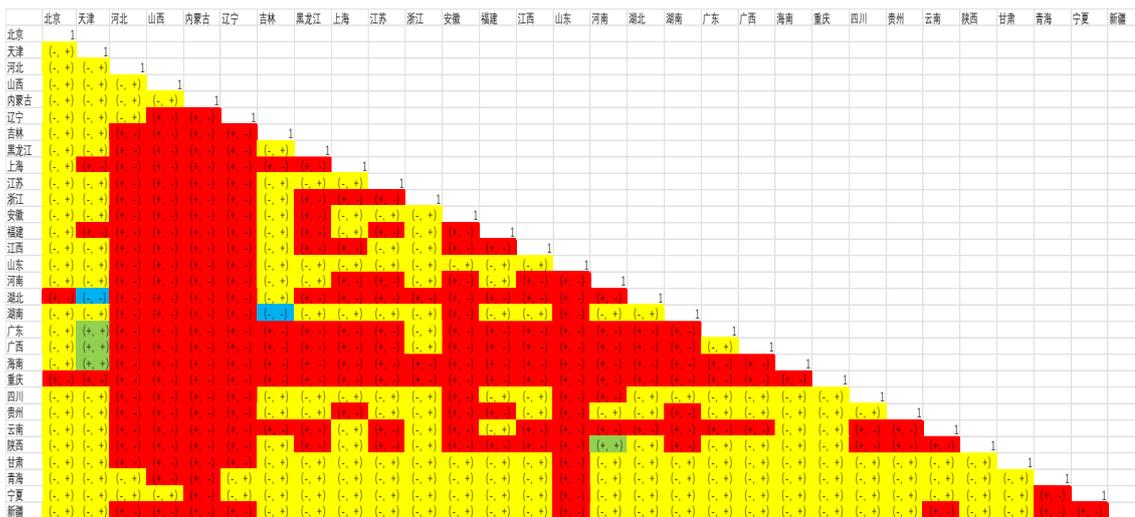


图 4.5 2015 年中国省间隐含能流通效应关系

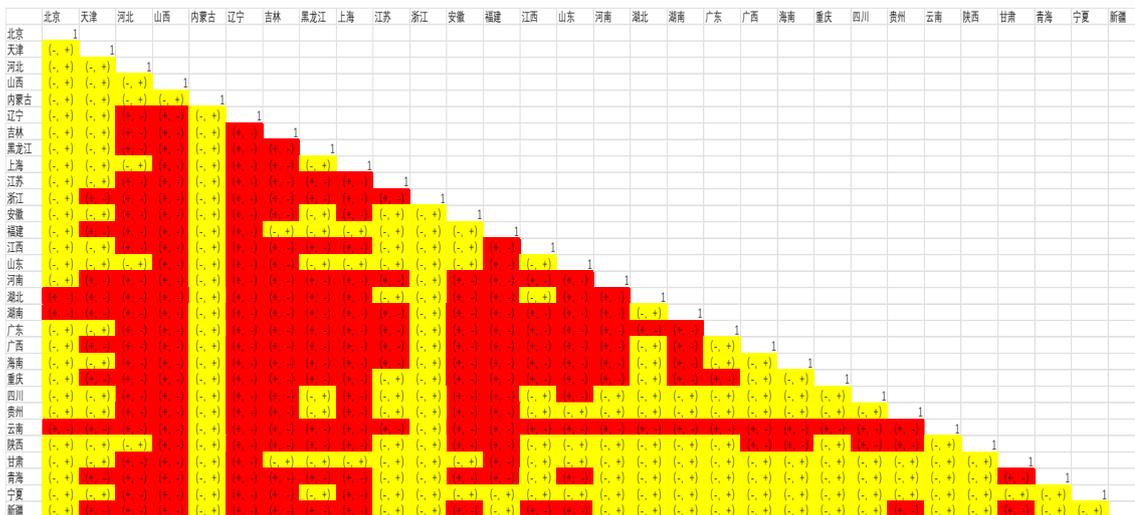


图 4.6 2017 年中国省间隐含能流通效应关系

从图 4.5、4.6 来看，中国省间隐含能流通系统中共有 435 对生态关系。将 2015 年和 2017 年中国省间隐含能流通效应关系对比可发现，在 2015 年时中国省间隐含能流通系统中四种生态关系均有出现，其中本质上为相互关系的控制关系 (+, -),

-)与被控制(-,+)关系占据主导位置,且二者比例相当,分别为49.88%和48.97%,互惠关系(+,+)和竞争关系(-,-)仅占据0.69%和0.46%;到2017年,省间隐含能流通系统中的生态关系只剩下控制关系与被控制关系,分别占据约50.34%和49.66%,二者地位上升且比例依旧相当;且省份间通过隐含能的间接交互使得大约60.46%的生态关系发生变化。结果表明,各省之间的控制和被控制关系始终处于主导地位,隐含能流通系统的共生关系水平有待提高,其中大多数的省间控制关系发生反转,控制与被控制关系可类比生态系统中的被捕食者-捕食者关系,因此可以反映隐含能流通链上多数省份之间的上下游关系出现方向变化。

从系统整体生态关系变化结果来看,在互惠与竞争关系上,2017年时湖北-天津、湖南-吉林由竞争关系变为了天津控制湖北、吉林控制湖南,广东-天津、海南-天津以及陕西-河南的关系都由互惠转变为后者被控制关系,广西-天津则有互惠关系转变为广西控制状态;在控制与被控制关系上,2017年所有的省间生态关系只剩下控制与被控制,包括单个节点在内,整个网络系统的路径传导都存在效率低下、发展单一的缺点。

从节点省间生态关系变化结果来看,各省都存在或多或少生态关系变化的情况,省间生态关系的变化方向存在显著的不确定性。其中上海、陕西、内蒙古以及湖南等地与其他省的生态关系转变数量较多,转变数量最多的是内蒙古,该省与25个省份的生态关系都从被控制转为控制关系,上海、吉林以及青海与其他省的生态关系同样也是转变为控制关系的居多,由此可见,这些省份在商品生产贸易过程中吸收了大量源自其他省份的产品及服务,地区的技术密集型产业与能源依赖性产业贸易势头相对强劲;而湖南省与其他省的生态关系转变大多是由控制关系转为了被控制关系,该省将较多的贸易隐含能消耗工作转嫁给了其他省份。新疆与陕西两省则出现控制与被控制生态关系均衡的状态,说明两省在转移隐含能消耗的同时也承接了相当一部分的隐含能流出工作。

相比于2015年,2017年时中国省间隐含能流通系统呈现出隐含能流出重心迁移至控制关系数量较多的少数省份。北京、天津、内蒙古、江苏、浙江及河南这六个省市与其他省市的生态关系基本都处于控制状态,这些省份一半属于经济发达城市,繁盛的经济贸易活动是这些省份高隐含能消耗的主要原因(Li, 2021),另一半则是属于经济稍欠发达但能源丰富的城市,依靠资源天赋负担了周边城市中间产品隐含能消耗任务,承接了较多能源依赖性的产品生产贸易活动,节能责

任日渐重大。而西北、东北、西南、南部沿海及长江中游地区的大部分城市在 2017 年时都转为了被控制状态，证明这些省份在系统中都是其他省份的“捕食对象”，为其他地区所利用，在国内贸易中扮演商品流转中心的角色，但同时也会将隐含的能源赋予到中间产品中，进而流通到其他省份，增加他省隐含能源的消耗量

相比于 2017 年，系统中省份间的众多生态关系发生了方向的变化，这种变化具有未知性，会受到网络结构、总通量及其他省份隐含能的流入量、流出量等多种因素交互影响。随着国内贸易链的不断发展，省份间贸易交互深度与广度都在不断加深，贸易链中省份的上下游关系显著且在不断发生着变化，至 2017 年中国省间隐含能流通系统中仅存的互惠关系对也已消失，省间的生态关系只剩下控制与被控制关系。对于生态流通系统而言，互惠关系对的增加会更有利系统的发展，相反，竞争、控制和被控制关系对的增加则会弱化系统发展的规模和效率。由此看出该系统的网络路径效率较低，系统内部各节点省份都在相互控制，阻碍了中国省间隐含能流通系统的网络结构优化及升级发展。各省之间应大力发展互惠关系、互帮互助，实现国内省间联动节能效应，共同构建省与省之间的隐含能流通良好关系。

5 中国各省隐含能流通网络影响因素研究

5.1 变量选取依据

本文选取 2015 年和 2017 年大陆 30 省（除西藏外）的隐含能流通量为被解释变量。由于本文的隐含能流通研究骨架是投入产出研究体系中以引力模型基本原理立足的多区域内在关联分析（孟德友和陆玉麒，2009），因此文中部分解释变量的选取脱胎于经典的贸易引力模型。Tinbergen（1962）和 Poyhonen（1963）最早提出将引力模型用于探究国际贸易流通，在研究中融合物理学的万有引力定律，即物体间的吸引力大小与两边距离的平方成反比，与双方质量成正比，其认为国家间的贸易交互主要受制于双方的经济规模及地理距离；同时在新贸易理论中亦强化了规模收益递增理论，认为国际贸易愈发繁盛是由于规模经济的发展（Krugman，1987）；另外，Anderson 和 Wincoop（2003）基于不变替代弹性支出系统推出了贸易引力模型，为贸易引力模型的使用提供了坚实的理论基础，因此本文选取地区生产总值来表征地区经济规模、省会城市间的距离来表征地区地理距离，并作为影响各省国内贸易隐含能流通量的因素。

由于经典引力模型涉及的解释变量（只包含 GDP 和地理距离）较少，不能充分反应隐含能贸易的影响因素，因此依据 Ehrlich 提出的 IPAT(环境负荷-人口-富裕-技术)理论（Ehrlich，1971），富裕程度、技术水平以及人口规模会对环境压力产生显著影响，本文又选择了各省人口数量作为影响各省国内贸易隐含能流通量的因素之一。当前我国一次能源消耗量不断上升，部分省份已出现能源短缺的问题，且传统化石能源的开采与消耗所带来的环境成本较高，针对此问题，各省开始逐渐实施能源多元化战略，更偏向于能源可再生、清洁能源的开发与利用，但各省份对清洁能源发展技术的掌握水平不一，部分省份可能会选择转移能源密集型的贸易生产活动，进而影响国内省间隐含能流通格局，基于此，本文选择煤炭消耗量占比表征能源结构作为影响各省国内贸易隐含能流通量的因素之一。

5.2 研究假说

依据 QAP 回归模型理论，被解释变量是 2015 年和 2017 年中国各省隐含能流通矩阵数据，解释变量则是各省的地区生产总值差异矩阵、省会城市地理距离矩阵、人口数量差异矩阵、煤炭消费量占能源消耗总量比重差异矩阵，差异矩阵的格值表示两省在此影响因素上数值的差异，如矩阵数据中的 x_{ij} 表示省份 i 与省份 j 在 x 因素上的差值，即 $x_i - x_j$ ，由此建立 QAP 回归模型，探究各变量对中国省间隐含能流通矩阵的影响程度。为避免因量纲不同而产生影响，矩阵变量均通过标准化处理。各影响因素数据来源于 2015 年和 2017 年中国统计年鉴和中国能源统计年鉴。解释变量如下：

(1) 经济发展水平 (GDP)：采用中国大陆 30 省 (除西藏外) 的地区生产总值差异矩阵。根据经典的引力模型，经济规模对贸易的影响一般也是正向影响。因此本文选取经济发展水平作为影响因素之一，并提出假说 1：经济发展水平差异对各省之间的隐含能流通量产生正向影响，且影响不断上升。

(2) 地理距离 (GES)：数据使用中国大陆 30 省 (除西藏外) 的省会城市距离。王薇和 Patrick (2020)、马远和宫圆圆 (2021) 等学者的研究均表明较远的地理距离会带来高贸易成本，双边贸易量会相对减少；但近几年随着贸易价值链的发展，国际贸易深度与广度也在扩大，有研究表明地理距离对发达经济体的全球价值链合作影响相对较小，并且随着贸易价值链的发展，地理距离所带来的贸易成本也会下降 (张志明等, 2021)。从以上观点引申到国内贸易价值链，本文选取地理距离作为影响因素之一，并提出假说 2：地理距离会对各省之间的隐含能流通量产生负向影响，且影响不断上升。

(3) 人口规模 (PS)：数据使用中国大陆 30 省 (除西藏外) 的人口数量差异矩阵。有学者认为人口规模的增长会增加能源消费，进而增加碳排放 (刘自敏和张娅, 2022)，韦彦汀等 (2022) 对成渝城市群碳排放的影响因素研究表明，人口规模会对城市碳排放量产生显著正向影响。由以上对碳排放的影响因素分析延伸至能源消耗流通，本文选取人口规模作为影响因素之一，并提出假说 3：人口规模差异会对各省之间的隐含能流通量产生正向影响，且影响不断上升。

(4) 能源结构 (EP)：数据使用中国大陆 30 省 (除西藏外) 的煤炭消耗量占比差异矩阵。章星 (2018) 采用可替代能源和核能占比表征能源结构，基于 QAP

回归模型证明出可替代能源和核能占比会对中国的三大真实能源（石油、天然气、煤炭）贸易强度均产生负向影响。郭军峰（2021）在研究中同样采用煤炭消费量占能源消耗总量的比重来表征能源结构，影响因素模型结果显示，煤炭消耗量占比会对各省能耗量产生不同程度的正向影响。张剑等（2023）的研究结果同样证明煤炭消耗量占比的增加会对中国能源消费碳排放量产生推动作用。中国省间的隐含能流通实质上也是能源的贸易，由此本文选取能源结构作为影响因素之一，并提出假说 4：能源结构差异会对各省之间的隐含能流通量产生正向影响，且影响不断上升

5.3 回归结果分析

基于 UCINET 软件，本文对 2015 年和 2017 年中国省间隐含能流通网络进行 QAP 影响因素回归分析。在计算中，本文将随机重复次数设定为 2000，由此得到两年回归结果。表 5.1 为 2015 年和 2017 年中国省间隐含能流通网络影响因素的模型结果。

表 5.1 中国省间隐含能流通网络影响因素结果分析

	2015	2017
GDP	0.032**	0.070
GES	-0.243**	-0.281**
PS	0.043**	0.048**
EP	0.005**	0.046**
R^2	0.140	0.124

注明：**表示 $P < 0.05$

从表 5.1 中可看出，模型的拟合优度 R^2 都较低，以往学者在使用 QAP 回归模型时，其拟合优度都不高。刘法建（2010）在进行中国入境旅游 QAP 影响因素分析时，其模型的 R^2 只有 0.21；覃静（2014）在建立世界能源贸易影响因素回归模型时， R^2 最大仅有 0.11 左右，而最小值则仅为 0.05；马远和徐俐俐（2016）在构建丝绸之路经济带沿线国家石油贸易影响因素回归模型时，无权网络模型的 R^2 为只有 0.11，而加权网络模型中则仅为 0.09；章星（2018）在对中国与东盟国家进

行真实能源网络的 QAP 回归分析时, R^2 最高仅有 0.229。本文中 R^2 较低的原因可能是 30 个省份中存在部分西部省份与其他省份的贸易隐含能联系偏低的情况; 并且本文的研究结论与大部分学者的研究结论较为一致, 也与以往相关理论研究和实际情况基本相符, 因此具有一定的科学理论支撑和解释力。

从表 5.1 中数据可发现, 经济发展水平会对中国省间隐含能流通网络产生正向影响, 验证了假说 1。经济与贸易二者之间相互影响, 省间经济水平差距的扩大可能暗含了各省贸易参与度、产业产品多样性以及商品生产加工技术等多方面的差异, 随着省间贸易合作需求的复杂化及多元化发展, 为配合日益增长的商品、服务供求规模, 发展落后的省份会选择借助他省的生产条件转移生产贸易活动, 而发达省份出于节能环保想法会选择将能源密集型生产活动转移到环境规制强度较低的省份, 因而省间的贸易流动越来越多, 隐含在生产贸易活动之下的能源消耗也在与日俱增。地理距离对中国省间隐含能流通网络产生负向影响, 且影响不断扩大, 验证了假说 2。从前文的通量分析中可发现, 偏远地区的西北省份在流通网络中同样处于边缘地带, 节点通量占比一直是省间最低, 而地处沿海地区、中部地区省份的通量占比不断上升。地理位置优势的不足会带来一系列发展的滞后, 高额的贸易运输成本、落后于平均水平的生产技术等等都会使得地区的贸易交互下降, 进而导致贸易隐含能流通的减少, 在网络中也会被不断边缘化。

人口规模对中国省间隐含能流通网络产生正向影响, 且影响程度不断上升, 验证了假说 3。人口规模的不断扩大, 会直接带动居民消费需求的上涨, 现有市场的商品与服务规模也会随之扩大, 这也推动了国内贸易的规模化与复杂化, 因此隐含的能源消耗也会不断增加。本文能源结构采用总体能源消耗量中煤炭消耗量的占比来表示, 模型结果表明, 能源结构会对中国省间隐含能流通网络产生正向影响, 且影响不断上升, 验证了假说 4。煤炭消耗量占比较低的省份, 能源结构较好, 为了优化产业结构、维护能源结构健康发展, 这些省份会将高耗能产业而向外转移, 相反煤炭用量占比较高的省份, 其背后可能存在能源结构不合理、商品生产加工技术落后的情况, 在贸易整体规模化的进程下, 不同能源结构的省份在商品贸易链、生产链的参与过程中能源成本逐渐增加, 因此能源结构差异越大, 省份间的贸易流通越多, 隐含能流动量也越多。

6 结论与建议

6.1 结论

本文利用多区域投入产出模型计算了 2015 和 2017 年中国省间隐含能流通数据,并利用生态网络模型对中国省间隐含能流通网络进行特征分析,同时选取 QAP 模型对中国省间隐含能流通网络进行影响因素研究。主要结论如下:

(1) 从隐含能消耗量变化中可看出,自 2015 年至 2017 年,中国省际隐含能的消耗重心逐渐向北部沿海地区转移,长三角与京津冀地区的隐含能消耗量较高;东北地区中除却低效粗放的黑龙江地区,其余两省隐含能大幅下降;沿海地区中福建、海南受广东、浙江贸易挤压致使贸易隐含能消耗一直较低;西北、西南地区的隐含能消耗水平较低,邻近的湖南、湖北等中部省份则吸收了较多的贸易隐含能。

(2) 从隐含能调出调入值变化中可看出,相比于 2015 年,2017 年京津冀地区的隐含能流动状态较为一致,隐含能净流出值下降明显;黑龙江、重庆、广西、云南、广东、海南、河南与陕西隐含能一直是净流出状态,西北地区、福建、山西、内蒙古、四川、贵州、吉林与辽宁则偏向于隐含能流入;2017 年时,江苏与浙江省的隐含能净流出量都较高,上海隐含能净流入量数值增长较多;长江中游地区的省份隐含能流出量与流入量都在下降,湖南、湖北与江西都为隐含能净流出状态、安徽省则为隐含能净流入状态。

(3) 从隐含能流转重心来看,长江中游与黄河中游地区的省份在国内贸易隐含能往来中占据了较多份额,隐含能流动数值较高;南部沿海地区、西北地区的隐含能总体流动数值及占比都偏低;北部沿海地区、西南地区的隐含能流动数值及占比都略有下降。从隐含能流出量数据来看,浙江、广东、江苏的隐含能流出值一直居于前列,福建、甘肃、海南、青海和宁夏一直处于隐含能流出值中省份排名低位。从隐含能流入量数据来看,内蒙古、山西、河北和辽宁等这些能源储备量丰富但经济发展偏中游省份的排名较高,宁夏、青海和海南等地隐含能流出、流入值都偏低。

(4) 在上升性分析中,首先从系统的稳定性分析来看,2017 年的 AMI 值要高于 2015 年,省间贸易隐含能的总流通量在下降,意味着系统的信息交互限制和组织能力变高,结构约束不断被强化,隐含能在省间流通会更有效率。系统多样

性指数 H_R 以及系统抵抗外界干扰变化的能力 S 都略有上升趋势, 表明系统经历变化的能力上升, 自身稳定性得到一定的发展。其次从系统可持续性分析来看, 中国省间隐含能流通系统的上升性 A 和发展能力 C 都在增加, 系统的恢复弹力 R 则出现下降趋势, 表明外界环境对于系统的干扰力度减小。最后从系统的冗余度分析来看, 2015 年和 2017 年中国省间隐含能流通网络系统的 α 相对过高, 系统的上升性较高, 冗余度较低, 整体网络偏向于高效率强脆弱的不可持续状态。

(5) 在环境元分析中, 从通量分析来看, 流通系统中通量重心偏于江苏、广东、河南、河北以及山东; 甘肃、宁夏、青海和海南四个省份处于系统边缘, 通量占比都在 0.5% 以下; 从效用分析来看, 至 2017 年中国省间隐含能流通系统中仅剩下控制与被控制关系, 由此看出该系统的网络路径效率较低, 系统内部各节点省份都在相互控制, 阻碍了中国省间隐含能流通系统的网络结构优化及升级发展。

(6) 针对中国省间隐含能流通网络建立 QAP 回归模型可知, 经济发展水平、人口规模、能源结构都会对中国省间隐含能流通网络产生正向影响, 且不断上升; 地理距离会对中国省间隐含能流通网络产生负向影响, 且不断上升。

6.2 建议

鉴于以上研究结论, 本文针对省间隐含能转移消耗格局健康化发展提出以下建议:

(1) 由于历史发展基础及区域经济政策的不同, 中国各省之间的经济、技术发展水平不一, 能源资源丰富但中等发达地区, 例如黄河中游等地区, 在国内产业链中承担了较多中间产品的加工运输, 隐含能的流出量相对较多。而发达地区的省份则较多扮演着隐含能流入的角色, 负担了经济发展和保护环境的双重任务。当前的隐含能流通在一定程度上加重了国内区域间的不平衡发展问题, 因此急需提出一个统筹全局发展、科学划分节能责任、立足实际情况的降能方案。从省间商品流动贸易的角度考虑隐含能消耗问题, 降低各省份间的产品生产贸易技术、能源使用效率等方面的差距, 从而有效降低区间贸易的能源成本。

(2) 西南、西北以及黄河中游地区均偏重于隐含能流出。西部偏远地区因产业结构落后、能源粗放型产业占比大, 而黄河中游地区在省间贸易链的参与程度较高, 承担了较多中间产品的加工及贸易。对于这些地区, 相应省份应加强产业优化建设, 提升高新技术产业以及绿色节能技术发展, 加强与周边长江三角洲强

省的贸易良性联系，实施省与省的“一对一”帮扶计划，帮助完成绿色节约型产业升级，减少贸易潜在能源消耗。

加强西北、西南地区产业优化建设。两地区在国内贸易链中参与度较低，隐含能交互量较少，主要是因为生产技术落后、重工业引进产业占比较多，难以满足其他区域的产品需求，地方未能做到经济与减能并重，当前目标应寻求经济、贸易稳步增长，抑制高耗能产业过快膨胀，以产业结构优化带动地方经济发展。

(3) 从生态网络分析中可发现，中国省间隐含能流通网络结构约束不断被强化，一直处于高效率强脆弱的不可持续状态，对于此，各省可适当减少隐含能流动的路径选择，分散隐含能流动受到的约束力，即减少高能耗低收益的贸易交互路线，简化国内贸易链结构，优化掉不必要的贸易分支或链条。直至 2017 年，各省之间的生态关系仅为控制与被控制，竞争及互惠关系消失，省与省之间在贸易链上的上下游关系过于明确，因此各省之间应互帮互助，借以当前已有的长江经济带、黄河经济带等经济组织来实现国内省间联动节能效应，促进企业技术及人才的跨省流动，共同构建省与省之间的隐含能流通良好关系。

(4) 对于隐含能通量数值与消耗量数值较高的广东、河南、河北等省份，政府应明确这些省份是节能的重点区域，可从这些省份入手，查找隐含能流动方向及地点，严格把控商品及服务的流转流程，加强各产业的能源消耗控制力度，再以此为纲领，进而再对整体省间隐含能流通网络进行优化建设。

(5) 煤炭消耗量占比的增加会带动更多的隐含能消耗流动，应降低各省的煤炭消耗比例，增加清洁能源的使用量，大力发展地区清洁能源的开发与运输技术；地理距离的增加会减少省间隐含能的流通，各省份应加强贸易成本的控制，西部等偏远地区应注意提高贸易参与度，改善产品生产及运输技术，做到贸易增加、成本维稳。

6.3 展望与不足

本研究虽然从整体上对中国省间隐含能流通网络进行了分析，但仍然存在一些不足，这些都需要在今后的研究中继续完善。一是，本文基于省份层面进行隐含能流通网络特点分析，在计算过程中将各省的 42 部门隐含能流通量进行了合并，若从部门层面进行深入分析，亦可发现隐含能消耗量较多的具体省份具体部门，进而更能明确省份节能的方向及政策。二是，本文选取的影响因素较少，未从多

层面考虑省间隐含能流通网络影响因素，仅针对国内生产总值差异、地理距离、能源结构差异和人口规模差异对隐含能流通的影响进行研究，并未结合能源价格、技术进步等因素对省间隐含能流通网络进行影响研究，未来可将更多的影响因素融入到分析之中，使其更加完善。

参考文献

- [1] Anderson J, Wincoop E. Gravity with Gravititas: A Solution to the Border Puzzle[J], American Economic Review, 2003, 93: 170-192.
- [2] Baird D, Mcglade J M, Ulanowicz R E. The comparative ecology of six marine ecosystems[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences, 1991, 333(333): 15-29.
- [3] Bullard C W, Herendeen R A. The energy cost of goods and services[J]. Energy Policy, 1973. 3(4): 268-278.
- [4] Chen B, Li J, Wu X, Han M, Zeng L, Li Z, Chen G. Global energy flows embodied in international trade: A combination of environmentally extended input-output analysis and complex network analysis[J]. Applied Energy, 2018, 210: 98-107.
- [5] Costanza R. Embodied Energy and Economic Valuation[J]. Science, 1980, 210(4475): 1219-1224.
- [6] Dorfman B, Samuelson R, Solow R M. Linear Programming and Economic Analysis[M]. New York: McGraw-Hill, 1958.
- [7] Ehrlich P R, Holdren J P. Impact of population growth [J]. Science, 1971, 171(3977): 1212-1217.
- [8] Fath B D, Patten B C. Review of the foundations of network environ analysis[J]. Ecosystems, 1999, 2: 167-179.
- [9] Guo S, Shen Q P G. Multiregional input-output model for China's farm land and water use[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(1): 403-414.
- [10] Guo S, Li Y, Hu Y, et al. Embodied energy in service industry in global cities: A study of six Asian cities[J]. Land Use Policy, 2020, 91: 104264.
- [11] Gao C, Su B, Sun M, Zhang X, Zhang Z. Interprovincial transfer of embodied primary energy in China: A complex network approach[J]. Applied Energy, 2018, 215: 792-807.
- [12] Grossman G, Jeffrey H. "Determinants of bilateral trade: dose gravity work in a neoclassical world?" In the regionalization of the world economy[J]. Chicago: University of Chicago Press, 1998, 10-45.
- [13] Han M, Lao J, Yao Q, et al. Carbon inequality and economic development across

- the Belt and Road regions[J]. *Journal of environmental management*, 2020, 262: 110250.
- [14] Hao X, An H, Qi H, Gao X. Evolution of the energy flow network embodied in the global fossil energy trade: Based on complex network[J]. *Applied Energy*, 2016, 162: 1515-1522.
- [15] Hong J, Tang M, Wu Z, Miao Z, Shen G. The evolution of patterns within embodied energy flows in the Chinese economy: A multi-regional-based complex network approach[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 47: 101500.
- [16] Hannon B. The structure of ecosystems[J]. *Journal Theoretical Biology*, 1973, 41(3): 535-546.
- [17] Krugman P R. “Is Free Trade Passe? ”[J]. *The Journal of Economic Perspectives*, 1987, 1(2): 131-144.
- [18] Lenzen M, Moran D, Kanemoto K, et al. International trade drives biodiversity threats in developing nations[J]. *Nature*, 2012, 486(7401): 109-112.
- [19] Liu Z, Geng Y, Lindner S, et al. Embodied energy use in China’s industrial sectors[J]. *Energy policy*, 2012, 49: 751-758.
- [20] Li J, Fang H, Fang S, et al. Embodied Energy Use in China’s Transportation Sector: A Multi-Regional Input–Output Analysis[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(15): 7873.
- [21] Leontief W W. *Input-output economics*[M]. Oxford: Oxford University Press, 1986.
- [22] Leontief W W. The Structure of the American Economy[J]. *The Journal of Economic History*, 1941, 1(2): 181-246.
- [23] Lietaer B, Ulanowicz R, Goerner S. Options for managing a systemic bank crisis[J]. *SAPI EN. S. Surveys and Perspectives Integrating Environment and Society*, 2009 (2.1).
- [24] Latham L G, Scully E P. Quantifying constraint to assess development in ecological networks[J]. *Ecological Modelling*, 2002, 154: 25-44.
- [25] Morris J T, Christian R R, Ulanowicz R E. Analysis of size and complexity of randomly constructed food webs[J]. *Aquatic food webs: an ecosystem approach*, 2005: 73.

- [26] Meng J, Liu J, Guo S, et al. The impact of domestic and foreign trade on energy-related PM emission in Beijing[J]. *Applied Energy*, 2016, 184(12): 853-862.
- [27] Pöyhönen Pentti. A Tentative Model for the Volume of Trade between Countries[J]. *Weltwirtschaftliches Archiv*, 1963, (90): 93-100.
- [28] Patten B C, Bosserman R W, Finn J T, et al. Propagation of cause in ecosystems[J]. *Systems analysis and simulation in ecology*, 1976, 4: 457-579.
- [29] Patten B C. Environs: Relativistic elementary particles for ecology[J]. *American Naturalist*, 1982, 119(2): 179-219.
- [30] Sun X D, Li J S, Qiao H, et al. Energy implications of China's regional development: New insights from multi-regional input-output analysis[J]. *Applied Energy*, 2017, 196: 118-131.
- [31] Szyrmer J, Ulanowicz R E. Total flows in ecosystems[J]. *Ecological Modelling*, 1987, 35(1-2): 123-136.
- [32] Tang M, Hong J, Liu G, Shen G. Exploring energy flows embodied in China's economy from the regional and sectoral perspectives via combination of multi-regional input-output analysis and a complex network approach[J]. *Energy*, 2019, 170: 1191-1201.
- [33] Tinbergen J. Shaping the world economy; suggestions for an international economic policy[J]. 1962.
- [34] Ulanowicz R E. Growth and development: ecosystems phenomenology[M]. Springer Science & Business Media, 2012.
- [35] Ulanowicz R E, Goerner S J, Lietaer B, et al. Quantifying sustainability: Resilience, efficiency and the return of information theory[J]. *Ecological complexity*, 2009, 6(1): 27-36.
- [36] Wang S, Chen B. Energy-water nexus of urban agglomeration based on multiregional input-output tables and ecological network analysis: a case study of the Beijing–Tianjin–Hebei region[J]. *Applied Energy*, 2016, 178: 773-783.
- [37] Zhang Y, Zheng H M, Yang Z F, et al. Multi-regional input-output model and ecological network analysis for regional embodied energy accounting in China[J]. *Energy Policy*, 2015, 86: 651-663.

- [38]Zhang Y, Zheng H, Fath B D, et al. Ecological network analysis of an urban metabolic system based on input-output tables: Model development and case study for Beijing [J]. Science of The Total Environment, 2014, 468-469: 642-653.
- [39]蔡海亚, 赵永亮, 徐盈之. 中国能源贫困的时空演变格局及其影响因素分析[J]. 软科学, 2021, 35(04): 28-33+42.
- [40]陈锡康. 完全综合能耗分析[J]. 系统科学与数学, 1981, (1): 71-78.
- [41]陈秀莲, 郭家琦. 中国虚拟水贸易的测度、评价与影响因素的实证分析: 基于投入产出公式和 SDA 分解模型[J]. 现代财经(天津财经大学学报), 2017, 37(1): 101-113.
- [42]邓光耀, 陈荟荟. 增加值贸易视角下中国区域间隐含能贸易测算及其影响因素分析[J]. 资源科学, 2022, 44(05): 1036-1050.
- [43]高鹏, 岳书敬. 中国产业部门全要素隐含能源效率的测度研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2020, 37(11): 61-80.
- [44]郭珊, 韩梦瑶, 杨玉浦. 中国省际隐含能源流动及能效冗余解析[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 733-744.
- [45]公丕芹, 冯超. 中国隐含能存量测算及政策启示[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(09): 75-81.
- [46]郭军峰. 能源消耗强度区域差异与影响因素分析[J]. 煤炭技术, 2021, 40(10): 232-234.
- [47]韩梦瑶, 刘卫东, 杨茗月. 低碳转型下中国高耗能行业的碳风险传导解析: 基于隐含碳关联网络视角[J]. 地理研究, 2022, 41(01): 79-91.
- [48]韩刚, 袁家冬. 东北三省城市规模、紧凑度对能源消耗的作用机制研究[J]. 现代城市研究, 2017(03): 90-96.
- [49]李方一, 刘卫东, 公丕萍. 中国产业能耗的区域差异与区域联系[J]. 地理科学, 2015, 35(1) :38-46.
- [50]李怀政, 汪宇. 全球贸易隐含能源网络形成机制及其地位测度[J]. 对外经贸, 2021(10): 6-11+145.
- [51]李吉喆. 基于投入产出模型的城市碳排放代谢分析[D]. 华北电力大学(北京).
- [52]刘峰. 中国进出口贸易能源消耗问题的研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.
- [53]刘自敏, 张娅. 中国碳排放的时空跃迁特征、影响因素与达峰路径设计[J]. 西

- 南大学学报(社会科学版), 2022, 48(06): 99-112.
- [54]刘法建, 张捷, 陈冬冬. 中国入境旅游流网络结构特征及动因研究[J]. 地理学报, 65(8): 1013-1024.
- [55]马远, 徐俐俐. 丝绸之路经济带沿线国家石油贸易网络结构特征及影响因素[J]. 国际贸易问题, 2016(11): 31-41.
- [56]孟德友, 陆玉麒. 基于引力模型的江苏区域经济联系强度与方向[J]. 地理科学进展, 2009, 28(05): 697-704.
- [57]马远, 宫圆圆. “丝绸之路经济带”能源贸易网络态势解构及影响因素——基于社会网络分析法[J]. 国际商务(对外经济贸易大学学报), 2021(04): 101-119.
- [58]穆献中, 朱雪婷. 城市能源代谢生态网络分析研究进展. 生态学报, 2019, 39(12): 4223-4232.
- [59]彭焜, 朱鹤, 王赛鸽, 等. 基于系统投入产出和生态网络分析的能源-水耦合关系与协同管理研究——以湖北省为例[J]. 自然资源学报, 2018, 33(9): 1514-1528.
- [60]覃静. 世界能源贸易网络的结构特征及其影响因素分析[D]. 湖南大学, 2014.
- [61]施智敏, 刘忠林, 郝岩, 等. 区域碳排放的产业部门关联机制——基于生态网络分析的吉林省实证研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2022, 58(02): 223-231.
- [62]申俊, 孙涵, 成金华. 中国城镇居民完全能源消费的空间计量分析[J]. 资源科学, 2016, 38(3): 439-449.
- [63]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.
- [64]韦彦汀, 李思佳, 张华. 成渝城市群碳排放时空特征及其影响因素[J]. 中国环境科学, 2022, 42(10): 4807-4816.
- [65]王雪艳, 张永凯, 周亮, 等. 甘肃省虚拟能行业分布及其省际贸易空间格局[J]. 中国环境科学, 2020, 40(04): 1847-1856.
- [66]王薇, Patrick Q. 丝绸之路经济带能源贸易的空间网络特征及影响因素分析[J]. 贵州社会科学, 2020, (3): 123-131.
- [67]王锋, 高长海. 中国产业部门隐含能源的测度、分解与跨境转移: 基于 CRIO 模型的研究[J]. 经济问题探索, 2020, (09): 1-11.

- [68]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(03): 595-607.
- [69]姚秋蕙, 韩梦瑶, 刘卫东. “一带一路”沿线地区隐含碳流动研究[J]. 地理学报, 2018, 73(11): 2210-2222.
- [70]袁晋军. 全球价值链视角下隐含能源贸易网络拓扑结构特征及影响因素分析[D]. 湖南大学, 2019.
- [71]杨宇. 中国与全球能源网络的互动逻辑与格局转变[J]. 地理学报, 2022, 77(02): 295-314.
- [72]周志田, 杨多贵. 虚拟能: 解析中国能源消费非常规增长的新视角[J]. 地球科学发展, 2006, 21(3): 320-323.
- [73]张志明, 周彦霞, 熊豪, 等. 地理距离如何影响全球价值链合作: 理论模型与国际经验[J]. 经济评论, 2021, (03): 75-88.
- [74]章星. 中国与东盟能源贸易网络的结构特征及影响因素分析[D]. 华中科技大学, 2018.
- [75]章辉, 蒋瑛. 基于方法改进后的中国对外贸易隐含能测算[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(10): 94-102.
- [76]张剑, 刘景洋, 董莉, 等. 中国能源消费 CO₂ 排放的影响因素及情景分析[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(1): 71-78.

附录

2015年和2017年中国各省隐含能消耗量及净流出值

	2015年		2017年	
	隐含能消耗量	净流出值	隐含能消耗量	净流出值
北京	7525.11	5532.94	6710.95	3886.87
天津	6440.91	2516.13	4137.93	973.59
河北	6445.14	-5906.32	8715.37	-2998.13
山西	4126.82	-5086.63	3089.97	-12098.04
内蒙古	4854.38	-9906.25	3805.22	-6818.69
辽宁	5632.27	-7472.91	4712.38	-9068.77
吉林	5777.66	2027.62	4702.07	-3116.08
黑龙江	5469.78	-82.19	7991.42	1450.76
上海	6062.73	1182.54	4380.84	-680.56
江苏	11951.95	-238.26	12039.06	2570.78
浙江	14605.02	7301.53	15223.71	10528.41
安徽	8397.17	-3878.05	5469.74	-620.19
福建	2953.39	-310.96	2240.33	-1955.34
江西	3702.54	179.89	4883.69	797.60
山东	5632.58	-4355.04	6158.75	-4137.85
河南	12253.50	1436.40	15064.78	4683.19
湖北	6420.72	3583.24	4513.06	1434.03
湖南	6958.65	-1722.85	6905.38	3144.48
广东	13786.68	8512.74	15501.94	7653.64
广西	4900.61	1558.21	4588.25	48.04
海南	1900.87	1345.71	1283.71	221.97
重庆	9687.66	7337.32	6267.76	2075.58
四川	4616.21	-1107.54	4663.33	-713.81
贵州	3490.28	-513.51	4996.43	-387.83
云南	7348.09	2482.70	7116.90	4598.35
陕西	7028.07	1555.76	8645.93	1874.71

续上表

	2015 年		2017 年	
	隐含能消耗量	净流出值	隐含能消耗量	净流出值
甘肃	2429.39	-1160.39	1865.50	-1664.70
青海	898.22	-1249.82	864.40	54.84
宁夏	853.91	-1782.29	2229.84	-903.86
新疆	4716.87	-1779.70	5332.67	-832.99

2015 年和 2017 年中国各省隐含能通量占比

各省通量占比					
	2015 年	2017 年		2015 年	2017 年
江苏	0.102	0.115	陕西	0.023	0.025
广东	0.096	0.111	黑龙江	0.021	0.023
河南	0.086	0.105	新疆	0.020	0.022
浙江	0.075	0.078	重庆	0.019	0.021
山东	0.064	0.075	上海	0.017	0.019
安徽	0.060	0.053	广西	0.015	0.016
湖南	0.058	0.037	天津	0.015	0.015
河北	0.053	0.036	吉林	0.014	0.013
云南	0.050	0.036	贵州	0.011	0.011
辽宁	0.048	0.034	北京	0.010	0.010
内蒙古	0.035	0.033	江西	0.009	0.009
四川	0.032	0.031	福建	0.008	0.009
湖北	0.026	0.027	甘肃	0.006	0.005
山西	0.024	0.027	青海	0.001	0.004
海南	0.001	0.001	宁夏	0.001	0.001

攻读硕士学位期间承担的科研任务及主要成果

发表论文:

- [1]邓光耀,陈荟荟.增加值贸易视角下中国区域间隐含能贸易测算及其影响因素分析[J].资源科学,2022,44(05):1036-1050.

致谢

三年很慢也很快，不知不觉毕业近在眼前，我们即将走向社会，开启新的征程，但大多数的我们做不到无畏无惧、勇敢向前。就我自己来说，我舍不得没有生活烦恼的校园生活，舍不得父母的庇佑，更舍不得这即将永远消失的学生时代。我很感激能遇到一群天天在一起吃喝玩乐的同学——曹静如、杜蔓云、金文婷、施悦、王蕾、王红、尹晨曦、张鸣宇等等，三年时间我们爬了兰山、白塔山，还去了南京、敦煌、成都、重庆、乐山、都江堰、青海湖、茶卡盐湖、西宁、西安、洛阳，也吃遍了兰州的烤肉与牛肉面，在我被论文痛苦折磨的时候，也有他们深夜帮我；还有同师门的学长刚哥，在毕业后还会帮我画图；同届的小钰、周总跟我一直相依为命。非常高兴也很感激能遇到这么好的同学，也希望以后可以友情不断，一直坚持。我研究生三年顺利度过最应该感谢的是我的导师——邓光耀老师，在我拖延进度、实证艰难以及带着痛苦面具修改论文之时，导师依旧耐心指导帮助，处处包容我，大年三十还能接收我论文，正月里修改我论文，半夜一点还回我消息，很感激也很幸运遇到这样的好老师。最后感谢我的家人，在我跟他们鬼叫人生艰难的时候开解我帮助我。

当下的我们总是慌张而又焦虑的，一边找工作、一边写论文还要参加各种考试，我们总想着熬过这段时间就好了，所以从心理上就在期盼日子早些过去，但过去之后我们又会发现，时间过得太快，好像没有认真去过每一天。一生很短，每当我们陷入困境时，若总想着快快过去，最后只会感叹光阴荏苒，与其这样不如把握当下，做好该做的事，剩下的时间出去看看风景，珍惜友情与亲情，困境总会过去。

当我们遇到坎坷时，有时会觉得好像过不去了，但当我们走过这段路再回头望时，又感觉那好像也不是什么大事，也都走过来了，回首向来萧瑟处，归去，也无风雨也无晴。面对未来，我们都充满了迷茫、害怕和自卑，但我们最终都会顺利毕业，走完自己的路，回首望去，轻舟已过万重山。

最后，谨向百忙之中参与评审的各位专家、学者致以最诚挚的谢意，感谢你们对论文的审查以及提出的宝贵建议。