



西南财经大学
SOUTHWESTERN UNIVERSITY OF FINANCE AND ECONOMICS

2022 届 本科毕业论文（设计）

论文题目： 复杂经济网络的节点重要性和系统效应研究

学生姓名： _____

所在学院： 经济信息工程学院

专 业： _____

学 号： _____

指导教师： _____

成 绩： _____

2022 年 3 月

西南财经大学

本科毕业论文原创性及知识产权声明

本人郑重声明：所呈交的毕业论文是本人在导师的指导下取得的成果，论文写作严格遵循学术规范。对本论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。因本毕业论文引起的法律结果完全由本人承担。

本毕业论文成果归西南财经大学所有。

特此声明

毕业论文作者签名：

作者专业：

作者学号：

年 月 日

摘要

本文先通过中国国家统计局年鉴获得了数据，然后通过度量构建产业关联网络和空间关联网络，得到产业节点之间的初步关系。再将二者网络融合到一起，得到了不同省份的产业节点之间的产业空间关联网络。然后对此网络进行了基于传统运筹学的分析，分别对此复杂网络使用了 PageRank 算法和 Hits 算法，然后结合每个节点的 pr 值和 hub 值构造了一个重要性节点度量公式，并以此对网络节点进行重要性分析。接着对于节点展开聚类分析，为了降低聚类分析所消耗的时间，故而对数据矩阵进行降维，使用变分自编码器对数据进行降维，然后开展聚类分析，综合运算结果为宏观经济政策提出建议。

关键词：复杂网络；PageRank；HITS；变分自编码器；聚类分析

Abstract

This paper first obtained data from China National Statistical Yearbook, and then built industrial association network and spatial association network through measurement to get the preliminary relationship between industrial nodes. Then the industrial spatial association network between industrial nodes in different provinces is obtained by integrating the two networks. Then, this network is analyzed based on traditional operations research. PageRank algorithm and Hits algorithm are respectively used for this complex network. Then, combining pr value and HUB value of each node, a measure formula of importance node is constructed to analyze the importance of network nodes. Then cluster analysis is carried out for the nodes. In order to reduce the time consumed by cluster analysis, dimension reduction is carried out for the data matrix. Variational autoencoder is used to reduce the dimension of the data, and then cluster analysis is carried out.

Keywords: Complex network; PageRank; HITS.; Variational autoencoder; Clustering analysis

目录

1. 引言	4
2. 模型设定及数据	6
2.1 产业关联网络的构建	7
2.2 空间关联网络	9
2.3 产业空间关联网络的构建	12
2.4 第二、三区域的处理	13
2.5 数据	14
2.6 构建网络图	15
3. 网络分析	15
3.1 基于传统复杂网络算法的分析	17
3.2 基于变分自编码器的聚类	21
3.3 各聚类的重要性度量	22
4. 结论	24

1. 引言

我国地大物博，产业门类齐全，具有庞大的国内市场，依托着庞大的国内市场和门类齐全的产业体系，我国在全供应链中占据着重要的地位。2020 年以来国际形势发生了新的变化，由于新冠疫情影响，全球经贸大幅度下滑，许多产业受到了不同程度的冲击，使得我国乃至全世界的供应链安全面临着巨大的不确定因素。在产业链上，任何一个节点所受到的冲击都可能通过各种经济关联关系对其他产业链造成影响，并且进而形成全局性的经济波动，造成对宏观经济的风险冲击，所以，研究中国的产业空间集聚和分布，产业风险传染等问题显得尤为重要。

要实现对宏观经济风险的早期预警，需要找到微观数据与宏观经济风险之间的内在逻辑。由于某个区域的产业受多方面因素的影响而且这些影响相互关联，计量经济学的方法已经不能描述产业网络体系的特征；而且直观的宏观经济数据忽略了中间投入产出结构，无法描述产业冲击的传染过程。因此，本文使用复杂网络方法构建基于产业关联和空间关联的产业空间关联网络来解构宏观经济风险的微观关联基础。

2000 年后国内外学者使用网络理论以消费者、企业、政府、产业作为节点来研究产业空间集聚问题。相比于传统的计量方式，网络分析打破了各个区域的各个产业的孤立性，能更加系统地考虑区域间联系。张许杰和刘刚（2008）实证了英国产业结构地网络性质，认为英国产业结构网络是一个小世界网络。这一期间出现了真正意义上的以产业空间为节点的构建产业空间网络的研究。吕康娟和付旻杰（2010）使用中国区域间投入产出表全面地分析了中国区域间产业空间网络的结构特征，但对模型构建部分描述不够详尽。后来，国内学者开始通过区域间投入产出表建模来分析产业空间网络结构，韩斌（2011）根据四川和重庆两地的区域投入产出表构建了成渝区域间产业空间网络并进行了两地的产业关联分析。相似地，王浩宇（2017）据北京、天津、河北三地的区域投入产出表构建了京津冀区域间产业空间网络（MRIO）并进行了产业关联和空间分布分析。此外，一些学者创建了全球范围的区域间投入产出表 GMRIO，Tukker and Dietzenbacher (2013)对 GMRIO

的发展进行了详细介绍，并对主要 GMRIO 数据库的特点进行了总结比较。区域间投入产出表的应用在能源方面、环境方面等十分广泛：Steen-Olsen et al. (2014) 分析了 MRIO 表中的 CO₂ 乘数对 CO₂ 总量的敏感性。Wu et al. (2017) 等分析了中部、东北部和西部省份省级贸易和 PM_{2.5} 排放问题。Zhang et al. (2017) 等从全球、双边和国家三种不同的贸易模式对碳排放污染避风港假说进行全面分析。Duarte (2019) 等研究了 15 年来世界贸易中碳的变化轨迹和决定因素。Zhang et al. (2016) 等研究了 2002-2007 年中国国内贸易中体现能源转移的时间和空间变化。Hubacek and Feng (2016) 等研究了国际贸易中土地需求与全球土地利用分配问题。Sanf lix (2016) 等研究了锂离子电池组的使用寿命周期对环境和经济的影响。Portella-Carbo et al. (2016) 等研究了国际贸易和供应链全球化对本国国内就业的影响。

基于区域间投入产出表的分析是研究产业空间网络的重要方法，是因为区域间投入产出表本质上是生产资料由生产端到消费端的转移，能反映任意区域的各个产业到其他区域的各个产业的投入产出转化关系以及任意区域的各个产业的生产资料的来源部门以及产成品的流出部门，这体现了产业间“方向”和“量”的联系，可以通过矩阵运算形成对节点众多、联系复杂的中国产业有机整体的研究。所以，若要进行多区域的产业分析，需先构建中国区域间投入产出表。早在 1951 年，Isard 提出了一种构建区域间投入产出表的模型，但该模型需要每个地区每个产业的基本流量数据，还需要区域间的每个产业的流量数据，因此对基础数据的要求很高。Isard 模型的流入和流出各项一般为一个整体，并没有区分流入和流出的具体来源和流向。后来学者们又提出使用较少数据的 MRIO 模型 (Moses, 1955) 和 Pool 模型 (Leontief 等, 1963)。在区域间投入产出表的研制中，区域间贸易系数的估算始终是一大难点，需要运用空间联系来估算最可能的区域间贸易分布 (张亚雄等, 2012)，引力模型、熵模型等相继被引入到贸易分布系数的估算中。1978 年，有研究在 Pool 模型 (Leontief and Alan, 1963)、无约束引力模型和最大熵模型 (Wilson, 1967) 的基础之上，加入系统变量，提出了更为灵活的双约束引力模型，形成了较为固定的引力模型的形式。还有诸多学者对区域间投入产出表进行了改造和创新。近年来，大数据的获取和分析技术日益成熟，Gao (2020) 等通过上下

游企业生产的增值税发票大数据建立了与中国国家统计局的投入产出表一致的区域投入产出表来跟踪利润转移和避税。

在对中国产业网络问题的研究中，研究文献的对象主要有两种：一是中国的部分或全部产业，二是中国的部分区域的全部产业或是中国全部区域的部分产业。但其中通过网络理论进行产业结构地研究少之又少，尚未形成对中国全部空间的全部产业格局的整体研究。在研究方法上，研究产业结构问题一般使用计量经济学的方法，用几个变量组成的数学公式来描述经济结构，但产业网络具有天然的系统性，计量经济学难以分析中国整体产业体系的全貌。在总结研究领域的空白和不足的基础上，本文使用复杂网络理论的进行建模，以各个区域的各个细分行业为节点，以跨地区的各个行业间的投入产出关系为关联边，将经济实体和联系抽象化，构建出第一个中国各个区域范围的所有产业的网络，即中国产业空间网络。一个覆盖全区域全产业部门的产业空间网络是研究宏观产业分布、产业转移现象甚至突发事件冲击的有用的工具。对产业空间结构进行分析，可以优化产业布局，提升区域经济发展水平，更好地落实区域经济协同发展战略。

2. 模型设定及数据

本模型结合产业经济学和空间经济学的思想，建立了涉及 m 个空间经济单位（区域）的 n 个产业的区域间投入产出表。该表分为三部分，包括第一区间的中间投入和中间使用部分、第二区间的最终使用和进口部分、第三区间的最初投入部分。简化的中国区域间投入产出表第一区间如表 1 所示。结合网络科学理论，可以把各个区间的各个部门和部门间的投入产出关系简化成复杂网络的节点和连边，区域间投入产出表第一区间共计 $m \times n$ 个节点和 $(m \times n) 2$ 条边。

表 2-1 区域间投入产出表第一区间

产出	中间使用			中间使
	区域 1	...	区域 m	

投入		部门 1	...	部门 n	...	部门 1	...	部门 n	用合计
中间投入	区域 1	部门 1	...	部门 n	...	部门 1	...	部门 n	
	
	区域 m	部门 1	...	部门 n	...	部门 1	...	部门 n	
	
	中间投入合计								

根据投入产出表的供求平衡原则，区域间投入产出表中 m 地区 i 产业的总产出应满足：

$$X_i^s = \sum_{j=1}^h \sum_{n=1}^l A_{ij}^{st} + F_i^s = \sum_{j=1}^h \sum_{n=1}^l a_{ij}^{st} X_i^s + F_i^s \quad (1)$$

A_i^{st} 表示从区域 s 到区域 t 的贸易流 ($s, t = 1, 2, \dots, m; i, j = 1, 2, \dots, n$)， a_{ij}^{st} 为直接系数矩阵的元素， X_i^s 表示 s 地区 t 产业的总产出或总需求， F_i^s 表示最终需求。写成矩阵形式为：

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

2.1 产业关联网络的构建

用 ω^I 表示产业之间基于中间品价值投入的产业关联矩阵（基本流量表的中间品投入产出部分），其矩阵元素 $\omega_{ij}^I = p_i x_{ij}$ ，表示产业 i 的产出中作为中间品而投入产业 j 的价值。由 ω^I 得到的产业关联网络用 Ω^I 表示。该网络是一个有权有向的复杂网络；其节点表示产业，节点权重为产业总产值；有向边表示两个产业的中间品价值投入关系。从微观经济来看，产业之间的中间品投入关系反映了产业之间的技术关联关系，联系投入和产出的关键就在于微观生产函数。

设经济体内有 n 个产业。产业产出符合 Cobb-Douglas 生产函数。产业 i 的总产

出为：

$$y_i = z_i \varsigma_i \ell_i^{\alpha_i} \prod_{j=1}^n x_{ji}^{a_{ji}} \quad (2)$$

其中， z_i 表示 Hicks 中性的生产率冲击（对劳动和资本的冲击相同）； ℓ_i 为产业 i 的劳动力投入； x_{ji} 为产业 i 使用产业 j 所生产中间品的投入（资本投入）。在均衡时，产业的总产出等于其总投入，因此 y_i 既代表了总产出，也代表了总投入。

生产技术将生产要素（劳动和资本）投入转化为产出，其中 α_i 为劳动在生产技术中的份额， α_{ji} 为中间品投入在生产技术中的份额，有 $\alpha_{ji} \geq 0$ ，且 $\alpha_{ii} > 0$ ，一般有 $\alpha_{ji} \neq \alpha_{ij}$ 。

进一步假设规模报酬不变，即劳动和资本投入对生产的影响是齐次线性的，那么有 $\alpha_i + \sum_{j=1}^n \alpha_{ji} = 1, \forall i$ 。

ς_i 为一般化参数，用于简化模型，有 $\varsigma_i = \alpha_i^{-\alpha_i} \prod_{j=1}^n \alpha_{ji}^{-\alpha_{ji}}$ 。代入生产函数(3)，可得：

$$y_i = (z_i)(\alpha_i^{-\alpha_i} \ell_i^{\alpha_i}) \prod_{j=1}^n (a_{ji}^{-\alpha_{ji}} x_{ji}^{\alpha_{ji}}) \quad (3)$$

2.1.1 企业利润

企业利润为其产出与要素成本之间的差异：

$$\pi_i = p_i y_i - w \ell_i - \sum_{j=1}^n p_j x_{ji} \quad (4)$$

其中 w 为给定的工资水平。企业决策在于选择合适的要素投入来实现利润最大化，其一阶条件分别为： $\frac{\partial \pi_i}{\partial x_{ji}} = p_i a_{ji} \frac{y_i}{x_{ji}} - p_j$ 和 $\frac{\partial \pi_i}{\partial \ell_i} = p_i \alpha_i \frac{y_i}{\ell_i} - w$ 。由一阶条件等于 0，可得：

$$x_{ji} = \frac{a_{ji} p_i y_i}{p_j} \quad (5)$$

$$\ell_i = \frac{\alpha_i p_i y_i}{w} \quad (6)$$

将(5)和(6)代入(3)，然后两边取对数，可得：

$$\ln\left(\frac{p_i}{w}\right) = \sum_{j=1}^n \alpha_{ji} \ln\left(\frac{p_j}{w}\right) - \varepsilon_i \quad (7)$$

其中 $\varepsilon_i = \ln(z_i)$ 表示生产冲击。

由(5)可得：

$$a_{ij} = \frac{p_i x_{ij}}{p_j y_j} \quad (8)$$

式(8)的左边为产业 i 向产业 j 的中间品投入在产业 j 的生产技术中所占份额 a_{ij} ，右边为产业 i 向产业 j 的中间品投入价值与产业 j 总产出的比例，也即 \mathcal{W}^I 矩阵元素 ω_{ij}^I 与该元素所在列对应产业的总产出之间的比例，或者说网络 Ω^I 中每条有向边的边权占入边节点点权重的比例。

2.1.2 消费者效用与市场均衡

设消费者效用函数为：

$$u(c_1, \dots, c_n) = \sum_{i=1}^n \beta_i \ln \frac{c_i}{\beta_i} \quad (9)$$

其中， c_i 为对消费者对产业 i 产品的消费量，且有 $c_i p_i = \beta_i w$ ； β_i 为该商品在消费者效用中的份额，且有 $\sum_{i=1}^n \beta_i = 1$ 。

市场出清条件为：

$$p_i y_i = c_i p_i + \sum_{j=1}^n x_{ij} p_i = \beta_i w + \sum_{j=1}^n a_{ij} p_j y_j \quad (10)$$

总的工资水平即为总的增加值，即 $w = GDP$ 。式(10)反映了产业产出、产业投入与产业增加值之间的关系，以及产业之间通过 a_{ij} 实现的相互关联关系。

2.2 空间关联网络

产业空间集聚指产业部门在空间中分布的高度集中现象，是经济活动的重要的地理特性（Krugman, 1992）。在时间范畴上，第一次产业革命后的工业时代就出现了明显的产业空间集聚特征，而且一直持续至今（周文, 1999）。在空间范畴上，产业空间集聚也符合“帕累托法则”，即存在经济活动自我强化现象，会吸引新的企业进一步进入该区域，因空间集聚进一步降低成本。（Martin 等, 1999）。对产业空间集聚最早可追溯到在新古典经济学家马歇尔的经典著作《经济学原理》的“工业组织（续前），专门工业集中于特定的地方”章节，该书中出现了对地方性工业各种起源的描述，同时马歇尔也从企业经济的外部性和企业自身的规模经济的方面研究了产业空间集聚的原因（Marshall, 2009）。随着韦伯产业集聚机制（Weber,

1982)、胡佛产业区位理论 (Hoover, 1948)、地域生产综合体理论的演进, 产业空间集聚的研究在上世纪七十年代出现了新产业区集聚机制, 该机制的一大突破认为产业间的联系是一种网状结构, 是形成集聚的一大原因, 这一机制引入了网络的概念 (Michael, 1989)。

假设经济体中存在 m 个空间经济单位 (区域), 用 \mathcal{W}^S 表示区域之间的空间关联矩阵, 其矩阵元素 ω_{st}^S , 表示区域 s 和区域 t 之间的空间联系强度。由 \mathcal{W}^S 得到的空间关联网用 Ω^S 表示。该网络是一个有权无向的复杂网络。

两个区域之间空间关联强度 ω_{st}^S 的刻画来源于空间经济中的引力模型。在引力模型中, 区域之间的空间关联关系会随着区域间的空间距离而衰减。但由于地理空间的非均质性, 这里的距离并不是一个简单的地理距离, 还必须考虑各类会影响这一非均质特定的政治、经济、社会和文化因素。其基本形式为:

$$\omega_{st}^S = \frac{\theta_{st}}{d_{st}^{\gamma_{st}}} \quad (11)$$

其中, d_{st} 为两个区域之间的地理空间距离; γ_{st} 为待估的参数, 是两个区域之间的距离摩擦系数, 衡量了地理距离对联系强度的影响程度; θ_{st} 是调整系数, 用于对结果进行标准化处理, 需要根据数据情况来分别处理。该模型表明, 两个区域之间的与两地之间的考虑摩擦系数之后的空间距离成反比。

2.2.1 两个区域之间的地理空间距离

两个经济区域之间地理距离, 用区域经济中心之间的球面距离来表示, 并假设每个区域的经济中心为其省会或直辖市的政府所在地。设 (α_s, β_s) 和 (α_t, β_t) 分别为区域 s 和区域 t 经济中心的经纬度坐标, 则两地之间的地理距离 d_{st} :

$$d_{st} = R \cdot \arccos[\cos(\alpha_s - \alpha_t) \cos\beta_s \cos\beta_t + \sin\beta_s \sin\beta_t] \quad (12)$$

其中 R 为球体半径。

2.2.2 区域内部的地理空间距离

要将产业关联和空间关联融合起来, 就必须解决区域内的产业关联问题。对于同一个区域内部, 不能简单地将产业间的距离设置为零。为求出同一个区域内部的产业距离, 假设区域内的产业分布为均匀分布, 且区域形状为面积不变的正方形。将正方形上随机两点之间的期望距离设为该区域任意两个产业部门之间的距离。

设正方形面积为 S ，那么正方形内随机两点 (x_{s1}, y_{s1}) 和 (x_{s2}, y_{s2}) 之间的预期地理空间距离 \hat{d}_{s1s2} 为：

$$\begin{aligned}\hat{d}_{s1s2} &= E\left(\sqrt{(x_{s1} - x_{s2})^2 + (y_{s1} - y_{s2})^2}\right)\sqrt{S} \\ &= \sqrt{S} \int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 \sqrt{(x_{s1} - x_{s2})^2 + (y_{s1} - y_{s2})^2} dx_{s1} dx_{s2} dy_{s1} dy_{s2}\end{aligned}\quad (13)$$

令 $x = x_{s1} - x_{s2}$ ， $y = y_{s1} - y_{s2}$ ，且 $x \in (0,1)$ ， $y \in (0,1)$ ，可得：

$$\hat{d}_{s1s2} = \sqrt{S} \int_0^1 \int_0^1 \sqrt{x^2 + y^2} (1-x)(1-y) dx dy \quad (14)$$

将上式再转化为极坐标，令 $x = r \cos \theta$ ， $y = r \sin \theta$ ，可得：

$$\begin{aligned}\hat{d}_{s1s2} &= 8\sqrt{S} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \int_0^{\frac{1}{\cos \theta}} \sqrt{r^2 \cos^2 \theta + r^2 \sin^2 \theta} (1 - \cos \theta)(1 - \sin \theta) r dr d\theta \\ &= \frac{(2 + \sqrt{2} + 5 \ln(\sqrt{2} + 1))\sqrt{S}}{15}\end{aligned}\quad (15)$$

2.2.3 距离摩擦系数

地理空间存在非均质性，即相同距离对经济联系的影响并不一定是相同的。更为重要的是，影响经济联系的距离并非单纯的地理距离，而是两地之间交互距离（Rosenthal 等，2004）或经济距离，因此需要通过距离摩擦系数来对地理距离进行调整，即通过幂指数 γ_{st} 来处理。如何得到合理的摩擦系数是模型是否合理有效的关键（Wilson，1971）。苏东水（2005）认为不同地区的产业联系不仅是该地区产业部门供给和需求关系的反映，而且是以产品为中介的经济联系，这一联系受到地理距离、交通运输状况、工业发展水平、地区政策、营商环境等因素的影响。例如，区域间的交通运输条件越好，就说明地理距离的相对影响更小。

对于交通状况，本文使用了区域的客运量和货运量指标。用 T_s^F 和 T_s^P 分别表示地区 s 的年客运量和年货运量。那么两地之间的距离摩擦系数可表示为如下函数：

$$\gamma_{st} = f\left(\left(\frac{T_s^F}{\sum_{s=1}^m T_s^F} + \frac{T_s^P}{\sum_{s=1}^m T_s^P}\right)\left(\frac{T_t^F}{\sum_{t=1}^m T_t^F} + \frac{T_t^P}{\sum_{t=1}^m T_t^P}\right)\right) \quad (16)$$

且两地的交通运输量越大，则 γ_{st} 越小。此外，大量的实证研究表明，地理距离对经济联系成本的影响系数 γ_{st} 通常在 1 左右。因此通过标准化方法，将 γ_{st} 调整到 $[0.8, 1.2]$ 区间，以实现更好的结果。

对于区域内，有：

$$\hat{\gamma}_{ss} = f\left(\left(\frac{T_s^F}{\sum_{s=1}^m T_s^F} + \frac{T_s^P}{\sum_{s=1}^m T_s^P}\right)^2\right) \quad (17)$$

2.2.4 空间关联网络的构建

将区域间空间关联和区域内空间关联融合起来，可以得到所需的空间关联矩阵 \mathcal{W}^S 和空间关联网络 Ω^S 。由于考虑了区域内部的空间关联， \mathcal{W}^S 的对角线元素是非0的，这使得 Ω^S 成为一个存在自环的非简单网。

2.3 产业空间关联网络的构建

产业空间关联网络是通过将产业关联网络和空间关联网络相互融合而形成的。假设经济体中存在 m 个空间经济单位（区域）和 n 个产业，用 \mathcal{W}^{IS} 表示产业之间的跨区域经济关联矩阵，其矩阵元素 $\omega_{is,jt}^{IS}$ ，表示区域 s 的产业 i 和区域 t 的产业 j 之间的经济关系强度。由 \mathcal{W}^{IS} 得到的产业空间关联网络用 Ω^{IS} 表示。该网络是一个有权有向的复杂网络。

首先，在 \mathcal{W}^S 的计算中，设

$$\theta_{st} = \frac{y_s y_t}{\sum_{s,t=1}^m \frac{y_s y_t}{d_{st}}} \quad (18)$$

从而使得 $\sum_{s,t=1}^m \omega_{st}^S = 1$ 。

那么有 $\omega_{is,jt}^{IS} = \omega_{ij}^I \omega_{st}^S$ ，满足 $\sum_{s,t=1}^m \omega_{is,jt}^{IS} = \omega_{ij}^I$ 。

由 $\omega_{ij}^I = p_i x_{ij}$ 可得：

$$\omega_{is,jt}^{IS} = p_{is} x_{is,jt} \quad (19)$$

即区域 s 产业 i 向区域 t 产业 j 的中间品价值投入，其中有 $\sum_{s=1}^m p_{is} \frac{y_{is}}{\sum_{s=1}^m y_{is}} = p_i$ ，

即产业产品价格为各地区产品价格的加权平均，并有 $\frac{\sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^m x_{is,jt}}{\sum_{j=1}^n \sum_{s,t=1}^m x_{is,jt}} = \frac{y_{is}}{\sum_{s=1}^m y_{is}}$ ，即区域 t 产业 j 在全行业的产出比例与中间品投入比例是相等的。由此得到 t 产业 j 在全行业的产出得到 Ω^{IS} ，即区域间产业空间网络。

通过将 $\omega_{is,jt}^{IS}$ 沿着产业维度聚合可形成新的考虑细分产业关联关系后的空间联

系关系，即：

$$\omega_{st}^{S^I} = \sum_{l,j=1}^n \omega_{is,jt}^{IS} \quad (20)$$

相应的空间关联矩阵和空间关联网络分别由 \mathcal{W}^{S^I} 和 Ω^{S^I} 表示。

在产业空间关联网络中，区域 s 的行业 i 的生产函数由(3)变为：

$$y_{is} = (z_{is})(\alpha_{is}^{-a_{is}} \ell_{is}^{\alpha_{is}}) \prod_{j=1}^n \prod_{t=1}^m (a_{is}^{-a_{is}} x_{jt,is}^{a_{jt,is}}) \quad (21)$$

企业利润由(4)变为：

$$\pi_{is} = p_{is} y_{is} - w \ell_{is} - \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^m p_{jt} x_{jt,is} \quad (22)$$

类似地，有：

$$x_{jt,is} = \frac{a_{jt,is} p_{is} y_{is}}{p_{jt}} \quad (23)$$

$$\ln\left(\frac{p_{is}}{w}\right) = \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^m a_{jt,is} \ln\left(\frac{p_{jt}}{w}\right) - \varepsilon_{is} \quad (24)$$

$$a_{is,jt} = \frac{p_{is} x_{is,jt}}{p_{jt} y_{jt}} \quad (25)$$

即区域 s 行业 i 向区域 t 行业 j 的中间品投入在区域 t 行业 j 的生产技术中所占份额 $a_{is,jt}$ ，等于区域 s 行业 i 向区域 t 行业 j 的中间品投入价值与区域 t 行业 j 总产出的比例，也即 \mathcal{W}^{IS} 矩阵元素 $\omega_{is,jt}^{IS}$ 与该元素所在列对应行业的总产出之间的比例，或者说网络 Ω^{IS} 中每条有向边的边权占入边节点点权重的比例。

市场出清条件(10)变为：

$$p_{is} y_{is} = c_{is} p_{is} + \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^m x_{is,jt} p_{is} = \beta_{is} w + \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^m a_{is,jt} p_{jt} y_{jt} \quad (26)$$

2.4 第二、三区域的处理

对于区域间投入产出表第二区间和第三区间的处理均采用最大熵原理对全国投入产出表的值进行分配。第二区间包括 f 个部门，第三区间包括 e 个部门。区域间投入产出表的第二区间的各个部门数据可以表示为：

$$MC_{if}^s = \frac{(I_2)_{if}}{\sum_i (I_2)_{if}} \frac{C_f^s}{\sum_s C_f^s} C_f \quad (28)$$

其中， I_2 为投入产出表第二部门矩阵， f 表示第二区间部门的编号； MC_{if}^s 表示

区域间投入产出表区域 s 的产业 i 的第 f 部门的值； $(I_2)_{if}$ 表示区域 i 的第 f 部门的值， C_f^s 表示全国投入产出表产业 m 的第 s 部门的值； C_f 表示所有产业的第 f 部门的值之和。由于 $C_f = \sum_s C_f^s$ ，公式 (5) 可以简化为：

$$MC_{if}^s = \frac{(I_2)_{if} C_f^s}{\sum_i (I_2)_{if}} \quad (29)$$

对于第三区间的处理与第二区间类似，区域间投入产出表的第三区间的 e 个部门数据可以表示为：

$$MP_{ie}^s = \frac{(I_3)_{ie} P_e^s}{\sum_i (I_3)_{ie}} \quad (30)$$

其中， e 表示第三区间部门的编号； MP_{ie}^s 表示区域间投入产出表区域 s 的产业 i 的第 e 部门的值； $(I_3)_{ie}$ 表示区域 i 的第 e 部门的值， P_e^s 表示全国投入产出表产业 m 的第 e 部门的值。

参照区域投入产出表第二区间的部门项，本文在区域间投入产出表第二区间 MC 中加入国内省外流出项，以保持各个区域各个产业的总投入与总产出相等。整理 Ω^{IS} 、 MC 、 MP 后，得到了完整的省级区域间投入产出表。

2.5 数据

依照上述建模思想，使用 2017 年的全国投入产出表数据、各行政区各个行业的增加值数据、城市地理信息数据和各区域客运量和货运量数据，本文构建了具有 1395 个节点和 1946025 条边的有权有向的产业空间网络。该网络以 31 个区域的 45 个细分行业为节点，以跨地区的各个行业间的投入产出关系为关联边。

2017 年的全国投入产出表来源于国家统计局，2017 年的原始的数据为 149 个部门，参考 42 部门的全国投入产出表分类，结合现有的数据信息，本文将 149 个部门的数据合并成了 45 个部门。各行政区各个行业的增加值数据、城市地理信息数据和各区域客运量和货运量数据源于《2018 中国统计年鉴》和《2018 中国工业统计年鉴》。

2.6 构建网络图

依照上述的构建网络复杂网路方法，本文构建了一个空间产业复杂网络，并且将邻接矩阵保存在了远程代码托管仓库中。

3. 网络分析

基于部门间的投入产出关联和微观经济模型，本文构建了 45 个标准行业之间的产业关联网络，并基于空间经济模型构建了中国大陆 31 个省级区域之间的空间关联网络，将两个网络融合为一个统一的基于 1395 个节点的中国产业空间网络，以反映不同地区不同行业之间的经济联系。如下图所示，出于展示方便，本文绘制了局部的空间产业关联网络。

3.1 网络结构分析

基于部门间的投入产出关联和微观经济模型，本文构建了 45 个标准行业之间的产业关联网络，并基于空间经济模型构建了中国大陆 31 个省级区域之间的空间关联网络，将两个网络融合为一个统一的基于 1395 个节点的中国产业空间网络，以反映不同地区不同行业之间的经济联系。



图 3-1

考察网络的结构，分析网络中那些连边较为重要，所以本文在此仅选取边权大于平均值三个标准差的连边来构建 2017 年的产业空间网络的骨干网。

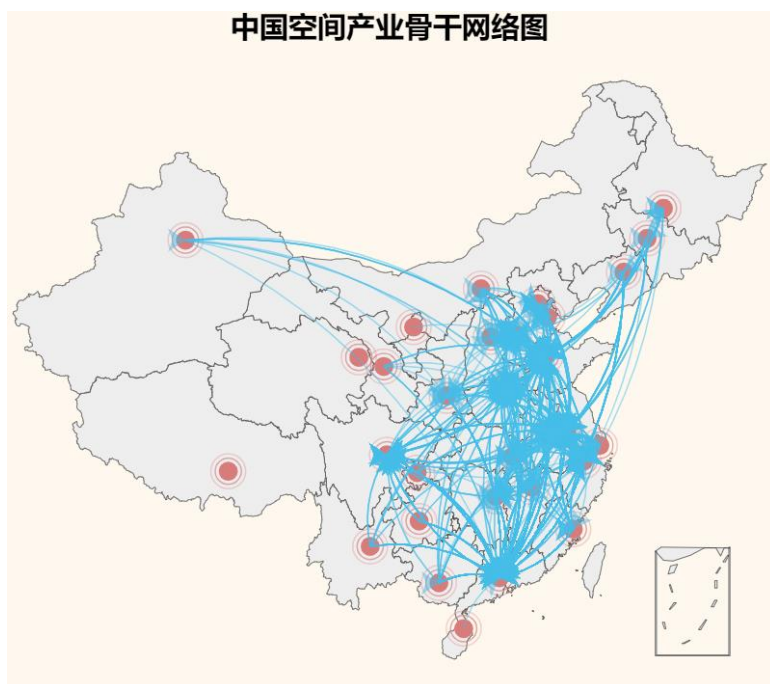


图 3-2

从产业的空间布局来看，我国区域经济具有较为明显的中心外围结构。按照我国十大经济区的划分，北部沿海经济区、东部沿海经济区、东南沿海经济区、长江上中游经济区、珠江上中游经济区的密集聚集现象较为明显，处于中心地带；而东

北经济区、黄河上中游经济区的产业集聚现象相对较小，处于过渡地带；其他地区几乎无密集聚集现象，处于边缘地带。

3.1 基于传统复杂网络算法的分析

3.1.1 PageRank 算法

PageRank 算法最初是由谷歌提出的网页排序算法，其基本想法是在有向图上定义一个随机游走模型，即一阶马尔可夫链，描述随机游走者沿着有向图随机访问各个结点的行为。

随机游走模型，给定一个含有 n 个结点的有向图，在有向图上定义随机游走（random walk）模型，即一阶马尔可夫链，其中结点表示状态，有向边表示状态之间的转移，假设从一个结点到通过有向边相连的所有结点的转移概率相等。

因为马尔可夫的特性，在状态转移矩阵满足约束的条件下，通过多次访问之后，每个结点的概率可以收敛到平稳分布，这时各个结点的平稳概率值就是其 PageRank 值，表示结点的重要度。PageRank 是递归定义的，PageRank 的计算可以通过迭代算法进行。

本文在此应用 PageRank 算法，认为 PageRank 的 PR 值可以反应复杂经济网络中的节点重要性，因为 PR 值是通过状态转移矩阵多次访问收敛到平稳分布后得到，所以连边越多，权值越大的节点的 PR 值也会越大。连边较多，权值较大的节点在复杂经济网络中也较为重要，所以本文认为 PR 值较大的节点在复杂经济网络中的位置也相对来说比较重要。

同时，本文认为，PR 值排名相对靠前（在 1395 个产业节点中排名前 10%，即前 139 名）的空间产业节点，在全国的空间产业节点中扮演着相对重要的地位。

首先本文对于总体数据使用 PageRank 算法，可以得出以下结果：

表 3-1

空间产业	PR 值排名
广东其他第三产业	1
广东电子通信	2
江苏其他第三产业	3

江苏化学制品	4
江苏交通运输	5
江苏建筑业	6
山东化学制品	7
江苏电气机械	8
江苏电子通信	9
广东批发零售	10
河北黑色金属	11
广东金融	12
江苏纺织业	13
江苏普通机械设备	14
广东电气机械	15
广东运输邮政	16
山东其他第三产业	17
山东食品加工	18
北京其他第三产业	19
广东建筑业	20

从表格中可以看出，对国内的整个空间产业复杂网络中，广东省、江苏省、山东省扮演着比较重要的地位，而实际中广东、江苏、山东是我国经济最为发达的三个省份，因此在节点重要性中排名较高是符合现实的。

同时，河北黑色金属在本文的网络中也扮演了相对重要的地位，这与二十多年来独占国内乃至世界第一的河北黑色金属产量是牢不可分的。大量需要黑色金属的产业的材料来源都源自河北，因此河北才会在本文的产业关联网络中占据一个比较重要的地位。

对个别省份的产业结果进行分析，在此处本文分析一下四川省的产业重要性，结果排名如下：

表 3-2

空间产业	PR 值省内排名	PR 值全国排名
四川其他第三产业	1	27
四川电子通信	2	38
四川农业	3	72
四川金融	4	79
四川运输邮政	5	91
四川化学制品	6	96
四川批发零售	7	118
四川电热生产供应	8	132
四川非金属矿物	9	134

四川食品加工	10	145
四川黑色金属	11	159
四川建筑业	12	166
四川房地产	13	193
四川饮料制造	14	214
四川住宿餐饮	15	220
四川石油天然气	16	252
四川普通机械设备	17	253
四川交通运输	18	256
四川石油炼焦	19	270
四川橡胶塑料	20	279

从表中可以看出，四川省比较强势的行业主要为其他第三产业，农业，金融，批发零售等产业。同时，四川通信在全国产业节点中也扮演着重要的角色。

3.1.2 HITS 算法

1999 年，Jon Kleinberg 提出了 HITS 算法。作为几乎是与 PageRank 同一时期被提出的算法，HITS 同样以更精确的搜索为目的，并到今天仍然是一个优秀的算法。

HITS 算法的全称是 Hyperlink-Induced Topic Search。在 HITS 算法中，每个节点被赋予两个属性：hub 属性和 authority 属性。同时，节点被分为两种：hub 节点和 authority 节点。hub，意为中心的意思，所以 hub 页面指那些包含了很多指向 authority 节点的链接的网页，在网站中，可以理解为一些门户网站，在本文的宏观经济学节点中，可以理解为一些供应链底层的产业节点；authority 页面则指那些包含有实质性内容的节点。HITS 算法的目的是：当用户查询时，返回给用户高质量的 authority 页面。

在此本文可以将 HITS 用于经济学的理由是，与网页类似，本文同样可以认为一个在产业网络中比较重要的节点通常应该被很多节点指向。同时，一个相对来说影响较大的节点也应该影响了较多的其他节点。

相比起 PageRank 算法来说，本文可以理解 HITS 将一个产业的供应和需求分开来看，分别从供应和需求的角度出发，考量某节点（即某个省份的特定产业）的重要性。这种考量机制相比起 PAGERANK 来说是更加科学和理智的，本文首先通过 HITS 算法求解出本关联网络中的每个节点的 Hub（供应）和 Authority 值。

在文认为 Hub 值较高的节点是在供应链中占据了比较重要的地位的节点，而 Authority 值较高的节点则是在需求一端占据了比较高地位的节点。

将邻接矩阵输入 HITS 算法，Hub 值的排序结果如下：

表 3-3

空间产业	Hub 值全国排名	PR 值全国排名
广东电子通信	1	2
四川电子通信	2	39
重庆电子通信	3	65
广东其他第三产业	4	1
广东电气机械	5	15
广东批发零售	6	10
广西电子通信	7	145
广东金融	8	12
四川其他第三产业	9	28
江苏电子通信	10	9
广东运输邮政	11	16
广东房地产	12	30
陕西电子通信	13	289
广东普通机械设备	14	68
广东建筑业	15	20
广东交通运输	16	49
贵州电子通信	17	439
广东专用机械设备	18	116
广东电热生产供应	19	25
四川金融	20	80

从表格中，本文可以看出电子通信行业拥有着比较高的 Hub 值，在 Hub 值排名前二十的空间产业节点中，有七个节点是电子通信的产业节点。

信息技术是当今社会经济发展的重要顶梁柱。电子通信，包括在生产中所需要的信息交流的手段，信息采集，信息传输，通信器材制造等方方面面，社会中几乎所有的产业为了维系生产都要采用现代化通信设备和手段，都与电子通信行业密切相关，因此电子通信行业 Hub 值较高是可以理解的。

除去电子通信行业之外，第三产业，金融业，运输和物流产业在 Hub 排名中也排名靠前，说明了三产、电子通信、运输物流、金融是在我国的供应链中占据了比较重要的供应地位。

3.2 基于变分自编码器的聚类

将物理或抽象对象的集合分成由类似的对象组成的多个类的过程被称为聚类。由聚类所生成的簇是一组数据对象的集合，这些对象与同一个簇中的对象彼此相似，与其他簇中的对象相异。聚类分析是由若干模式组成的，通常，模式是一个度量的向量，或者是多维空间中的一个点。聚类分析以相似性为基础，在一个聚类中的模式之间比不在同一聚类中的模式之间具有更多的相似性。本文将聚类分析应用于此处，是为了找出产业节点之间的内在相似性，通过将节点进行聚类，方便进行宏观政策调控和管理。

但是在应用聚类算法时，因为矩阵维度问题会造成算法运算时间过长，尤其是本文在此为了兼容图的邻接矩阵数据，会造成矩阵纬度较高，分类效果较差，因此本文选用自编码器对数据做一个特征降维处理。

自编码是一种以重构输入信号为目标的神经网络。它是无监督学习领域中的一种，可以自动从无标注的数据中学习特征。

自编码器由三个神经网络层组成：输入层、隐藏层和输出层。其中，输入层的样本也会去充当输出层的标签角色，即这个神经网络就是一个尽可能地复现输入信号的网络。自编码神经网络要求输出尽可能等于输入，并且它的隐藏层必须满足一定的稀疏性，通过将隐藏层中后一层比前一层神经元数量少的方式来实现稀疏结果。这相当于隐藏层对输入进行了压缩，并在输入层中解压缩。整个过程中一定会丢失部分信息，但是训练能够使得丢失的信息尽量的少，最大化地保留其主要特征。

变分自编码神经网络学习地不再是样本的个体，而是样本的规律。通过增加一个约束项将编码器生成为服从高斯分布的数据集，然后按照高斯分布的均值和方差规则任意取相关得到数据，并且将数据输入编码器还原为样本。

自编码器的训练过程如图所示，在进行 270 个 Epoch 之后，损失降低到了一个比较低的位置：

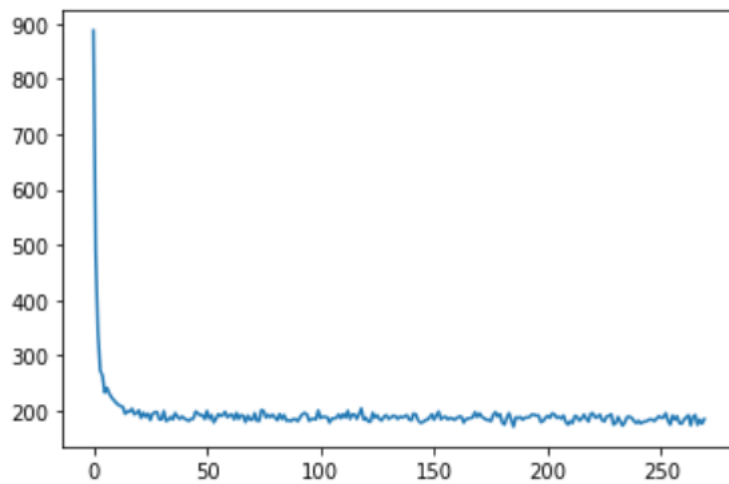


图 3-2

降维完成后，本文开始进行运行聚类算法，将聚类结果整理如下：

表 3-4

空间产业	分类	空间产业	分类	空间产业	分类
河北金属制品	1	江苏水的生产供应	2	浙江非金属矿采选	2
河北普通机械设备	1	江苏建筑业	3	浙江食品加工	2
河北专用机械设备	1	广东批发零售	2	浙江食品制造	8
江苏交通运输	3	广东运输邮政	2	浙江饮料制造	8
江苏电气机械	3	广东住宿餐饮	2	浙江烟草制品	9
江苏电子通信	3	广东金融	2	四川纺织业	10
山东仪器仪表	4	广东房地产	4	浙江纺织服装服饰	5
江苏其他制造产品	3	江苏其他第三产业	4	浙江皮革制品	5
江苏废弃资源回收加工	3	浙江农业	7	广西木材加工	7
江苏电热生产供应	3	浙江煤炭开采	7	浙江家具	4
江苏燃气生产供应	2	浙江石油天然气	6	浙江造纸和纸制品	2
江苏水的生产供应	2	浙江黑色金属采选	5	浙江印刷复制品	4

可以看出，我国的空间产业依然有着高度的内在相似性。依照分类结果，可以更好的衡量对于空间产业的发展，出台政策加以把控。

3.3 各聚类的重要性度量

在完成上述聚类后，本文决定对于每个聚类度量其在国内经济产业中的重要性。使用聚类而不使用原始的区域或者产业类的好处是，这样本文分析的产业簇应该更加贴近产业实际，因为聚类结果实现了对节点之间的低于和种类的跨越。结合上述的分析结果，本文首先定义一个簇内部的 PR 值和 HITS 值的衡量方式。

$$\text{Rank}_j = C \frac{\sum_{i=1}^{n_j} PR_i * \frac{Hub_i}{Aut_i}}{n_j} (j = 1, 2, 3 \dots 10)$$

对每一个聚类生成的簇，本文通过上文生成的 PR 值、HITS 的 Hub 和 Authority 值组合生成了每个簇的 Rank 值，并且加入了常数项用来修正数据，通过计算每个簇的 Rank 值对每个聚类簇进行排序。

表 3-5

簇序号	排名	包含节点
1	1	5,23,58,76.....
2	4	1,237,458,39.....
3	2	3,4,79,88,57.....
4	3	9,96,108,113.....
5	6	7,31,87,230.....
6	7	11,141,192,676.....
7	5	6,8,17,51,69.....
8	10	10,74,57,386.....
9	9	15,284,80,75.....
10	8	13,14,38,366.....

观察每一个簇，分析他们的主要特点，通过簇抓取产业节点之间跨过空间和产业限制的相似性与关联性，分析相似节点的重要性，例如本文对簇序号为 1 的聚类簇进行分析，发下其中包含了以下节点：

表 3-6

簇序号	包含节点
1	河北金属制品
1	河北普通机械设备
1	北京专用设备
1	内蒙煤炭开采
1	河北专用机械设备
1	河北黑色金属采选
1	内蒙电热生产供应
1	北京电气机械
1	陕西燃气供应
1	内蒙非金属矿采选

由此可以看出，节点聚类簇 1 中，主要包含的是金属冶炼，机械设备等传统重工业制造等产业节点。重工业是为国民经济各部门提供物质技术基础的主要生产资料的工业，是实现社会扩大再生产的物质基础，对我国经济发展的作用不言而喻。

在分析中，重工业部门对我国国民经济有着比较重要的意义，如电子通信、电子机械、金属冶炼等。由于重工业生产的产品是生产资料，重工业发生风险很容易传导到轻工业和农业，进而影响服务业的发展，故而在此节点簇 1 的排名结果是科学并且符合常理的。

4. 结论

一是鼓励关键重工业制造业产业的发展。尤其是例如金属矿采选吗，机械设备等。在推动重工业的发展中，一方面要鼓励新兴工业发展。现代制造业中关键的技术有工业物联网、机器人技术、人工智能、大数据、云端、网络安全、新材料与材料制造以及建模，仿真，可视化和浸入等，有关部门应该鼓励这些行业的龙头企业发展，鼓励其进行科技研发，进而占据国际领先地位，但也要对发展的进程进行了解跟进，防范在新技术研发过程中的各类风险，尤其是金融风险。另一方面也要弥补不足，在落后领域快速跟进，减少“卡脖子”技术。在逆全球化盛行的背景下，更应该发展大而全的工业体系，以企业创新为动力，打造出立足强大内需的国内价值链体系和以我为主的全球价值链体系的双循环经济发展格局。

二是格外关注一些 PR 值和 HITS 较高的产业，一些产业的 PR 值和 Hub 值都比较高。说明他们对于我国的经济影响较大，在产业链中占据着比较重要的供应地位，这些产业一旦受到冲击，可能对我国的宏观经济造成较大的影响，有关部门应该扶持产业生产方式更替和创新，尽快实现产业转型升级，同时注意这些产业的健康发展，出台政策对于其转型和正常维系发展进行保护。

三是明确各区域产业经济体的市场定位，安全监管促进第三产业的发展。有些区域产业经济体对消费影响较大，有些对资本形成影响较大。第三产业在 PR 值中排名较高，对经济的影响较大。对消费重要性较高或是资本形成重要性较高的经济体进行投资，能获得更高的消费或资本形成回报。有关部门可以划分具有消费和资本形成等属性的区域产业经济体，制定相应的同类产业政策通过生产最大效率地

影响消费和资本形成。比如，可以通过改善消费重要性数据较高地区的生产环境，更大效率地刺激消费。短期经济刺激政策都有一定的负面性，如带来通货膨胀、财政赤字等问题，从生产端改善的政策具有一定的稳定性和长期性，这与生产的技术环境、最终产品再分配的结构、消费者偏好等有关，而这些特征都是较为稳定的。

参考文献

- [1]韩斌. 基于区域间投入产出分析的成渝经济区产业关联研究[D]. 西南交通大学.2009
- [2]吕康娟, 付旻杰. 中国区域间产业空间网络的构造与结构测度[J]. 经济地理, 2010, 30(011):1785-1791.
- [3]苏东水. 产业经济学-第2版[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [4]张亚雄. 2002、2007年中国区域间投入产出表[电子资源][M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [5]张许杰, 刘刚. 基于复杂网络的英国产业结构网络分析[J]. 商场现代化, 2008, 000(009):151-152.
- [6]周文. 产业空间集聚机制理论的发展[J]. 经济科学, 1999, Vol.21(006):96-101.
- [7]Duarte R., V. Pinilla, and A. Serrano. Factors Driving Embodied Carbon in International Trade: A Multiregional Input - Output Gravity Model[J]. Economic Systems Research, 2018, 30(4):545-566.
- [8]Feng K., S. J. Davis, and L. Sun. Outsourcing CO₂ within China[J]. Proceedings of The National Academy of Sciences of The United States of America, 2013, 110(28). :11654-11659
- [9]Gao Y., M. Li, and Y. Lu. What Can Be Learned From Billions of Invoices? The Construction and Application of China's Multiregional Input-Output Table Based on Big Data From The Value-Added Tax[J]. Emerging Markets Finance and Trade, 56 (9), 1925-1941.
- [10]Hewings G. J. D., and R. C. Jensen. Chapter 8 Regional, Interregional and Multiregional Input-Output Analysis[J]. Handbook of Regional & Urban Economics, 1987, 1(4):295-355.
- [11]Hubacek, K., and K. Feng. (2016). Comparing Apples and Oranges: Some Confusion about Using and Interpreting Physical Trade Matrices Versus Multi-Regional Input - Output Analysis[J]. Land Use Policy, 50, 194-201.

- [12]Isard W. Interregional and Regional Input-Output Analysis: A Model of A Space-Economy[J]. Review of Economics and Stats, 1951, 33(4):318.
- [13]Krugman P. R. Geography and Trade[M]. Leuven: Leuven University Press.1991.
- Leontief W., A. Strout. Multiregional Input-Output Analysis[J]. Annals of Tourism Research. 1963.24(4):998-1001
- [14]Marshall A. Principles of Economics. London: Macmillan and Co..1920
- [15]Michael S. The Transition To Flexible Specialisation in The US Film Industry: External Economies The Division of Labour, and The Crossing of Industrial Divides Post-Fordism: A Reader[M]. UK: Blackwell Publishers Ltd, 1989.
- [16]Moses L. N. The Stability of Interregional Trading Patterns and Input-Output Analysis[J]. American Economic Review, 1955, 45(5):803-832.
- [17]Portella C. F. Effects of International Trade on Domestic Employment: An Application of A Global Multiregional Input-Output Supermultiplier Model (1995-2011)[J]. Economic Systems Research Journal of The International Input Output Association, 2016.28(1):95-117
- [18]Steen O. K., A. E. Owen, and G. Hertwich. Effects of Sector Aggregation on CO2 Multipliers in Multiregional Input – Output Analyses[J]. Economic Systems Research, 2014, 26(3):284-302.
- [19]Rosenthal S. S., and W. C. Strange. Evidence on The Nature and Sources of Agglomeration Economies[J]. Handbook of Regional and Urban Economics, 2006, 4:2119-2171.
- [20]SanfÉlix, J., RÚA D. L., and J. Schmidt. Environmental and Economic Performance of An Li-Ion Battery Pack: A Multiregional Input-Output Approach[J]. Energies, 2016, 9(8):584.
- [21]Tukker, A., and E. Dietzenbacher. (2013). Global Multiregional Input – Output Frameworks: An Introduction and Outlook[J]. Economic Systems Research, 25 (1), 1-19.
- [22]Wilson A. G. A Family of Spatial Interaction Models, and Associated Developments[J]. Environment & Planning, 1971, 3(1):1-32.

[23]Wu L., Z. Zhong, and C. Liu. Examining PM2. 5 Emissions Embodied in China' s Supply Chain Using a Multiregional Input-Output Analysis[J]. Sustainability, 2017, 9(5): 727.

[24]Zhang B., H. Qiao, Z. M. Chen, and B. Chen. Growth in Embodied Energy Transfers Via China ' s Domestic Trade: Evidence From Multi-Regional Input - Output Analysis[J]. Applied Energy ,2016, 184 , 1093-1105.

[25]Zhang, Z., K. Zhu, and G. J. Hewings. A Multi-Regional Input - Output Analysis of The Pollution Haven Hypothesis From The Perspective of Global Production Fragmentation[J]. Energy Economics , 2017,64 , 13-23.

致谢

不知不觉，一晃四年转瞬即逝，学校，学院，老师，辅导员为我个人在平时的生活、学习和升学中给予了莫大的宽恕和帮助，我也通过这四年从一无所知的学生成长为一个有着充分技能的学士，谢谢老师，谢谢学院，谢谢学校！

