

中国省际碳排放的空间关联及其影响因素研究

——基于社会网络分析方法

杨桂元, 吴 齐, 涂 洋

(安徽财经大学统计与应用数学学院, 安徽 蚌埠 233030)

摘要: 文章基于网络分析和 QAP 方法, 利用中国省际面板数据, 对我国碳排放的空间网络关联特征及其影响因素进行研究。结果表明: 样本期间内, 我国碳排放空间网络整体结构较为稳定、联系较为密切; 上海、北京、天津等处在网络的中心位置, 发挥着中介作用; 环渤海等地区属于“双向溢出”板块, 江浙沪等属于“净受益”板块, 新疆等资源丰富地区和中部地区为“净溢出”板块, 东北和西北等地区属于“经纪人”板块; 碳排放的溢出效应具有传递特征; 空间邻接关系、能源消耗差异和城镇人口差异对碳排放空间关联关系产生显著的影响, 产业结构差异和消费水平差异在一定程度上也影响着该网络的关联关系; 区域间能源消耗和城镇人口相似性越高, 省份之间碳排放的空间关联和溢出越大。最后, 针对实证研究给出结论和建议。

关键词: 碳排放; QAP 方法; 空间溢出效应; 空间关联关系

中图分类号: F061.5, F224.0 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2154(2016)04-0056-13

Researchs of China's Regional Carbon Emission Spatial Correlation and Its Determinants: Based on the Method of Social Network Analysis

YANG Gui-yuang, WU Qi, TU Yang

(Institute for Quantitative & Economic Research, Anhui University of Finance and Economic, Bengbu 233030, China)

Abstract: This article selects regional panel datas in China and studies on the spatial correlation network structure of carbon emission and its determinants based on the method of network analysis and Quadratic Assignment Procedure. The results show that during the sample period, the overall carbon emission network structure is relative and close contact. Shanghai, Beijing, Tianjin and other cities are in the center of the network and play an intermediary role. The Bohai Rim is bidirectional spillover plate. Jiangzhehu and other regions belong to main beneficial plate. Xingjiang and other cities with abundant resources and central part regions are net beneficial plate. The northeast, northwest and other regions belong to agent plate. The spillover effects of carbon emission has a transfer characteristics. The factors which are spatial adjacency relations and the difference of energy consumption and urban population play a significant influence on China carbon emission's spatial connection relationship. The indexes of industry structure and consumption level differences affect the network to some extent. The similar structure of regional resources consumption and urban population, the spatial connection relationships between and the degree of spillover effect are larger. Finally, related conclusions and recommendations are given for empirical research.

Key words: carbon emission; QAP method; spatial spillover effect; spatial correlation relationship

收稿日期: 2015-11-30

基金项目: 国家社会科学基金项目“组合预测模型与方法创新及其优化理论研究”(12BTJ008); 安徽财经大学研究生科研创新基金项目“区域碳排放效率的空间溢出效应与减排路径研究”(ACYC2015081)

作者简介: 杨桂元, 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事数量经济学研究; 吴齐, 女, 硕士研究生, 主要从事数量经济学方向研究; 涂洋, 男, 硕士研究生, 主要从事社会网络分析方向研究。

一、引言

随着经济和工业化的发展,全球气候变暖问题越来越受到人们的关注,引起各国对控制温室气体排放和发展低碳节能经济的高度重视。二氧化碳是大气中的主要温室气体,其过量排放会给生态环境带来很大压力,导致一个国家气候条件的变化进而影响生产能力,不利于经济可持续发展。中国是世界碳排放大国^[1-2],也是最早制定和实施《应对气候变化国家方案》的发展中国家。2000年以来,我国陆续制定《中国应对气候变化国家方案》《关于发展低碳经济的指导意见》和《中国应对气候变化的政策与行动》白皮书等。“十三五”规划更是强调了绿色低碳发展,全面控制温室气体排放,推进碳排放交易体系,由此中国将进入低碳新纪元,各地区积极推进低碳经济转型,力争达到碳排放与经济的脱钩发展。在这种背景下,对我国区域碳排放的现状分析及其影响因素的研究就显得尤为重要,其能够为政府制定相关政策提供依据,为此该问题受到学术界的广泛关注。

“新常态”下我国经济发展面临减排的挑战也愈发严峻。一方面,碳排放总量很大,在2013年超过了欧盟和美国的总和,达到100亿吨;另一方面,由于各地区经济发展水平、能源消耗、产业结构等各种因素的作用下我国碳排放呈现出空间非均质的特征^[3-4],地区存在明显的差异性。对于决策者而言,在制定减排计划前,需要了解区域之间碳排放整体结构,掌握区域之间的内部联系与差异。因此,在我国未来的碳排放研究中,针对区域碳排放空间关联关系和排放结构的实证就显得很有意义。因为这有利于详细制定区域目标分解的碳减排措施,突破减排壁垒。鉴于此,本文从复杂网络的视角出发,深度分析我国各省碳排放的空间关联关系,并在此基础上给出相应的减排策略。

二、文献综述

中国是经济快速发展的国家,经济发展所带来的能耗和碳排放等问题受到广大学者的关注。有关中国碳排放测算与分解、碳排放影响因素和碳减排措施等方面,国内外学者做了很多研究。目前较为认可的是采用IPCC清单法测算碳排放,研究能源消费中所产生的碳排放。徐国泉等(2006)^[5]采用LMDI指数法对中国1995-2004年人均碳排放的影响因素建立分解模型,定量分析能源效率、能源结构及经济发展水平等影响因素的作用。Maximilian和Carson(2008)^[6]、Song等(2008)^[7]、Chang(2010)^[8]分别建立不同的计量模型研究中国碳排放量及其影响因素。Choi等(2012)^[9]在实证分析中认为基础设施建设和重工业发展导致了我国高碳排放;Wang等(2014)^[10]利用数据包络分析方法测算我国省际碳排放效率,并估算区域减排成本。林柏强、蒋竺均(2009)^[11]首次建立中国碳排放的“库兹涅茨”模型,分析该曲线拐点并对碳排放进行预测,运用STIRPAT模型分析工业结构、工业能源强度及人均收入对人均碳排放的影响。张雷等(2010)^[12]运用产业-能源、能源-碳排放关联模型分析我国碳排放格局的变化及其原因。吴玉鸣(2015)^[13]基于增长趋同原理,采用变参数面板数据模型分析经济发展水平、人口规模和产业结构等因素对中国各省碳排放的影响,并讨论省际碳排放异质性趋同及其决定因素。徐盈之、王书斌(2015)^[14]运用空间计量模型,选择科研经费支出、高技术产业产值及环保支出等指标,考察区域间碳减排活动对临近区域的影响。马大来等(2015)^[15]基于至强有效前沿的最小距离法测算我国省际碳排放效率,并运用空间计量方法研究碳排放效率影响因素的空间效应。

通过文献梳理可知,空间因素逐渐被纳入碳排放影响因素的分析中,基于时序数据变化所分析的地区碳排放差异和收敛性质已经逐渐转为基于面板数据和空间计量模型所分析的区域碳排放空间关联与特征。对于现有文献,我们认为区域碳排放空间联系的研究,还存在以下不足:一是现有区域碳排放关系的研究均基于“属性数据”而非“关系数据”,没有从区域整体碳排放空间关联关系及结构、空间传导机制等方面的分析。传统空间计量方法分析碳排放及影响因素问题时,将空间关联局限在经济地理学上的“相邻”或“相近”地区上,这使得根据传统计量方法得到的结论有偏误。二是我国经济和碳排放均受到政府干预

和市场的双重作用,使得地区之间空间关联是复杂的,多重的,具有复杂网络特征。而现有文献中没有考虑我国地区之间碳排放的网络特质,本文试图弥补这方面的缺口。

本文针对现有文献不足,采用社会网络分析(Social Network Analysis, SNA)方法对中国省际碳排放的空间关联关系网络特征进行研究。SNA是一种基于图论,运用“关系数据”研究某系统的空间网络关联及结构的方法。Fagiolo等(2010)^[16]、Cassi等(2012)^[17]运用SNA分析方法分析金融一体化、国际贸易网络的关系和特征;Gargiulo等(2012)^[18]建立人口迁移网络并分析其演化过程;Ashadun等(2014)^[19]分析股票网络的特征与性质。近几年,国内学者在社会学、经济学、管理学等领域的研究中运用SNA方法分析某领域的空间网络关系。李敬等(2014)^[20]对我国区域经济增长空间网络进行研究,探讨区域之间经济增长的空间联动性及影响因素;冷炳荣等(2011)^[21]对我国城市经济空间关联网络进行研究;侯赞慧等(2009)^[22]建立长江区域经济一体化的空间关联网络并进行分析和研究;王娜等(2015)^[23]研究了“丝绸之路经济带”贸易联系网络结构;骆耀峰(2015)^[24]探究了SNA在自然资源管理中的应用;朱泯静等(2013)^[25]实证检验了企业创新绩效的网络结构;刘华军等(2015)^[26]研究了我国能源消耗空间关联的网络特征,并对网络效应进行分析。

与现有文献相比,本文主要的创新在于从复杂网络视角出发,利用我国省际之间的关系数据,运用SNA分析方法探究区域碳排放及其影响因素的空间关联关系。通过测度网络等级度、网络效率、网络关联系数、网络密度分析整体网络特征;通过测算度数中心度和中间中心度分析各省份在网络中的地位和作用;通过空间聚类将省份分成四个板块,讨论每个板块的属性特征和板块间的传导机制。其次,运用矩阵回归的方法(QAP)对碳排放空间关联的影响因素进行回归分析,该方法可以克服变量之间的多重共线性问题。此外,在明确各省处于碳排放网络中的地位和作用后,本文提供的政策建议对政府制定区域减排目标分解计划和建立区域协同减排机制更具有指导意义。

三、模型构建与变量选择

(一) 碳排放量空间关联网络的确定

省际碳排放的空间关联网络是探究空间碳排放之间相互关系的集合。网络中的“点”为各省份,网络中的“线”为各省份在碳排放关系上的空间关联,由此构成了省际碳排放量的空间关联网络。构建空间关联网络是网络分析的基础,根据现有文献,主要有VAR模型和引力模型。VAR模型对数据滞后阶数的选择较为敏感;而引力模型适用于总量数据,综合地理距离、经济发展、人口规模等因素刻画两两地区之间的联系强度,可利用截面数据刻画空间关联的演变趋势。因此,选择引力模型构建空间关联网络,在刻画区域间关系和空间动态演变趋势上更具有优势^[27]。本文将区域经济联系量化分析的引力模型运用到省际之间碳排放量的相互联系上,基于典型的公式^①进行修正,具体计算见公式(1)。

$$x_{ij} = \alpha_{ij} \frac{\sqrt{P_i C_i G_i} \sqrt{P_j C_j G_j}}{D_{ij}^2}, \alpha_{ij} = \frac{C_i}{C_i + C_j}, D_{ij}^2 = \left(\frac{d_{ij}}{g_i - g_j} \right)^2 \quad (1)$$

式(1)中, x_{ij} 表示省份*i*与省份*j*之间碳排放量的相互关系,与 x_{ji} 代表的意义不同; α_{ij} 表示省份*i*在省份*i*和省份*j*之间碳排放联系中的贡献率; P_i 、 P_j 表示省份*i*、*j*的城镇人口比重; C_i 、 C_j 表示省份*i*、省份*j*的二氧化碳排放量; G_i 、 G_j 表示省份*i*、省份*j*的实际GDP; d_{ij} 表示省份*i*与省份*j*的省会之间的球面距离, $g_i - g_j$ 表示省份*i*与省份*j*的人均GDP差值,用这两者之比的平方 D_{ij}^2 表示省份间的“距离”。根据式(1),得到 $X = (x_{ij})_{30 \times 30}$ 表示省份之间的引力矩阵,取矩阵中每一行的平均值作为该行的“行阈值”,然后用这一行的每一个值与“行阈值”比较;若大于阈值,记为1,表示该行的省份与该列的省份在碳排放上具有关联关系;反之记为0,表示不存在关联关系。由此构建出省际碳排放量的空间关联网络矩阵,由于计算的引力矩阵 X

①文献[22]中的公式(1)为城市间经济联系的典型计算公式。

是非对称的,所以这是一个有向空间关联网。

(二) 碳排放量空间关联网的特征指标^[28-30]

1. 整体网络特征

一个群体内所有成员构成一个整体网。刻画整体网络特征的指标有网络密度、网络关联度、网络等级和网络效率。网络密度刻画了一个群体所有成员之间的联系程度,本文中则表示各省份之间碳排放量的紧密程度,若网络密度大,说明联系越紧密,实证中选择有向图的网络密度计算方法。网络关联度刻画了整体网的稳健性和脆弱性。若在一个网络中,任何两个成员之间存在直接或间接联系,则该网络有较强的关联性和稳健性;反之,若连线均通过某个成员链接,则该网络对这个成员依赖性较大,是非常脆弱的。网络等级刻画了网络中各成员非对称地可达,反映了各成员的支配地位。网络效率刻画了网络中各成员的联系效率,反映网络中存在多余线的程度。在省际碳排放网络中,网络效率越低,说明区域间存在更多的连线,溢出渠道多,网络也就更稳定。

2. 网络中各节点特征

各节点在网络中居于怎样的中心地位可以用度数中心性和中间中心性来刻画,常见的度量指标分别对应于度数中心度和中间中心度。运用绝对中心度和相对中心度来描述网络中某个节点的度数中心度。网络中,某个节点的绝对中心度表示与其直接相连的节点个数,绝对中心度的标准化形式就是相对中心度。在碳排放量网络中,选择绝对度数中心度,若网络中某个省份具有较高的度数,说明该省份居于网络的中心并与其他省份联系越多。在一个有向图网络中,各个节点的度数分为点入度(受益关联关系数目)和点出度(溢出关联关系数目)。在网络中,某个节点的中间中心度刻画该节点是否处在许多节点间相联系的连线上,表示它对其他节点的控制程度。在碳排放网络中,某省份若是处在图中其他节点的“中间”,说明该省能够控制其他省份碳排放量之间的相互联系。

3. 空间聚类一块模型

为了便于直观分析,可将复杂网络简化为块模型和像矩阵,采用空间聚类的方法将网络分块,研究每一块在网络中担任的角色与作用。本文将省际碳排放网络分块,可从总体结构上考察碳排放量空间关联网的情况以及板块内部结构状态。参照 Wasserman 和 Faust(1994)^[30]提出的评价网络内部模块的指标,可将区域碳排放量空间关联网分成四个板块:净(主)受益板块、双向溢出板块、净溢出板块、经纪人板块。净受益板块:处在该板块的成员内部关系比较多,外部关系较少,对其他板块的溢出效应较少;净溢出板块:该板块中的成员向其他板块的成员发出较多的关系,且较少接收外部关系;双向溢出板块:其成员向本板块内的成员以及其他板块的成员均发出较多的关系,但接收较少的外部联系,此板块上的成员对其他板块内的成员具有双向溢出效应;经纪人板块:板块内部成员间的联系较少,而与其他板块的成员接收和发出关系,在网络中担当“桥梁”作用。本文采用 CONCOR 迭代方法,选择最大分割深度为2,收敛标准为0.2,在碳排放空间关联关系上将我国的省份划分成四个板块,然后采用 Wasserman 和 Faust 的划分方法^①将“净受益”角色、“双向溢出”角色、“净溢出”角色、“经纪人”角色板块特征与这四个板块相匹配。

(三) 网络的 QAP 回归分析

多元回归分析中,前提之一是要解释变量之间相对独立,不能高度线性相关,否则会出现“多重共线性”,使得回归有偏误。此外,由于区域之间在地理位置上的相邻,这种相互关系也会影响回归,此时我们不能利用传统的统计检验和回归方法来分析,采用社会网络分析中关系层次(Dyadic correlation)的假设检验,其分为:矩阵相关性分析(QAP correlation)和矩阵的回归分析(QAP regression)。二次指派程序(Quadratic Assignment Procedure, QAP)以矩阵数据的随机置换(random permutations)为基础,比较两个方阵相似性的方法。该方法通过比较两个方阵相对应的各个格值,给出两矩阵的相关系数,并对系数进行非参数检验。QAP 回归分析是用于分析多个矩阵与一个矩阵之间的回归关系,见式(2)。

^①本文实证分析中参考了文献[29]以及李敬、刘华军等在具体实证中的应用。

$$R = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2)$$

式(2)中, R 为反映某个研究对象的空间网络关联关系矩阵,可理解为普通回归的被解释变量,本文中指我国省际碳排放量的空间关联矩阵。 $X_i (i=1, 2, \dots, n)$ 是影响因素矩阵,可理解为普通回归的解释变量, X_i 是影响碳排放量的且度量地区差异的方阵。QAP回归分析基本分为两步,先针对解释变量矩阵和被解释变量矩阵对应的长向量元素进行常规的多元回归分析,然后对被解释变量矩阵的各行与各列同时进行随机置换,再次回归,将所有的系数值估计值以及判定系数值保存。

四、实证结果与分析

(一) 数据来源与处理

选择2005-2012年为样本期间,选取中国30个省份^①作为网络节点,基于修正的引力模型(见式(1))建立空间关系矩阵,实证测算碳排放的空间关联性。二氧化碳排放量采用IPCC清单法核算,先将一次能源消耗折算成万吨标准煤,再根据IPCC清单法核算,见式(3): i, j, t 分别表示不同的省份、能源类别及年份, δ 为对应能源折算成万吨标准煤的系数; Q 为各能源消费量; α 为各能源二氧化碳排放系数; C 为二氧化碳排放量。

$$C_{it} = \sum_{j=1}^6 \delta_j \times Q_{ijt} \times \alpha_j \quad (3)$$

实证中所需原始数据来源:《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》和中国经济社会发展统计数据库。GDP数据采用价格平减指数折算成2000年不变价的GDP,以消除价格因素带来对GDP的影响。采用UCINET6.0软件^[31]处理数据。

(二) 区域碳排放量空间关联网络的特征分析

1. 整体网络特征及演变趋势

运用修正的引力模型确定了我国省际碳排放的空间关联关系,并依据此建立空间关联矩阵。图1至图4展示了2005-2012年中部分年份的我国省际碳排放的空间网络结构形态,可以观察到2005年以来网络形态较为稳定并具有典型的网络结构特征。

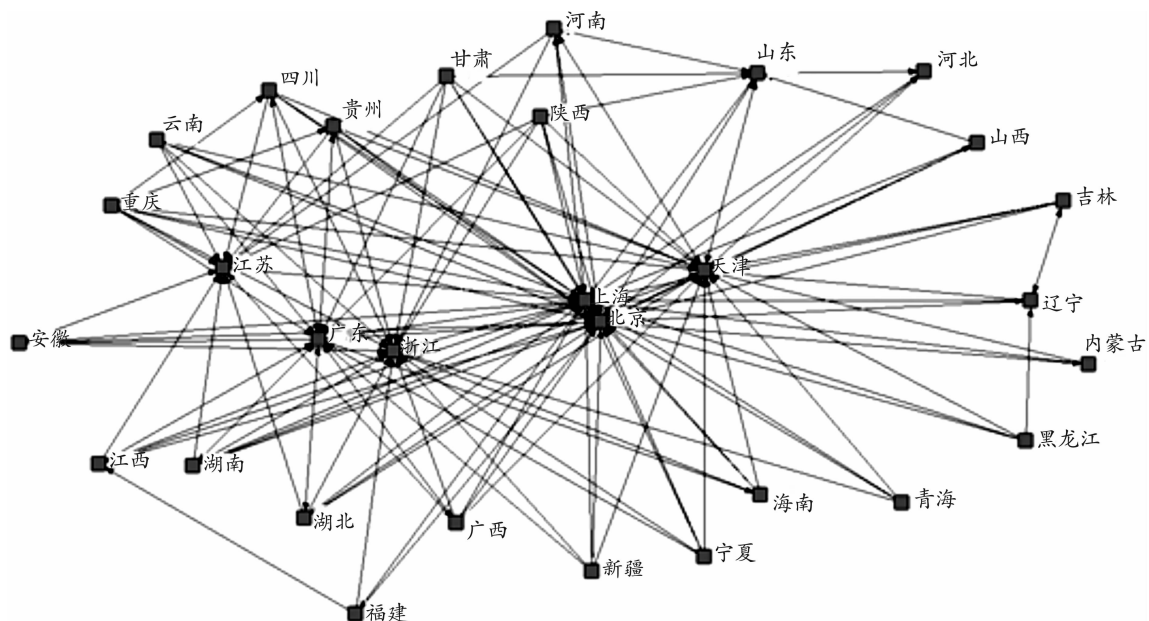


图1 2005年碳排放量的空间关联网络图

①由于部分数据缺失,不包括西藏和港澳台地区。

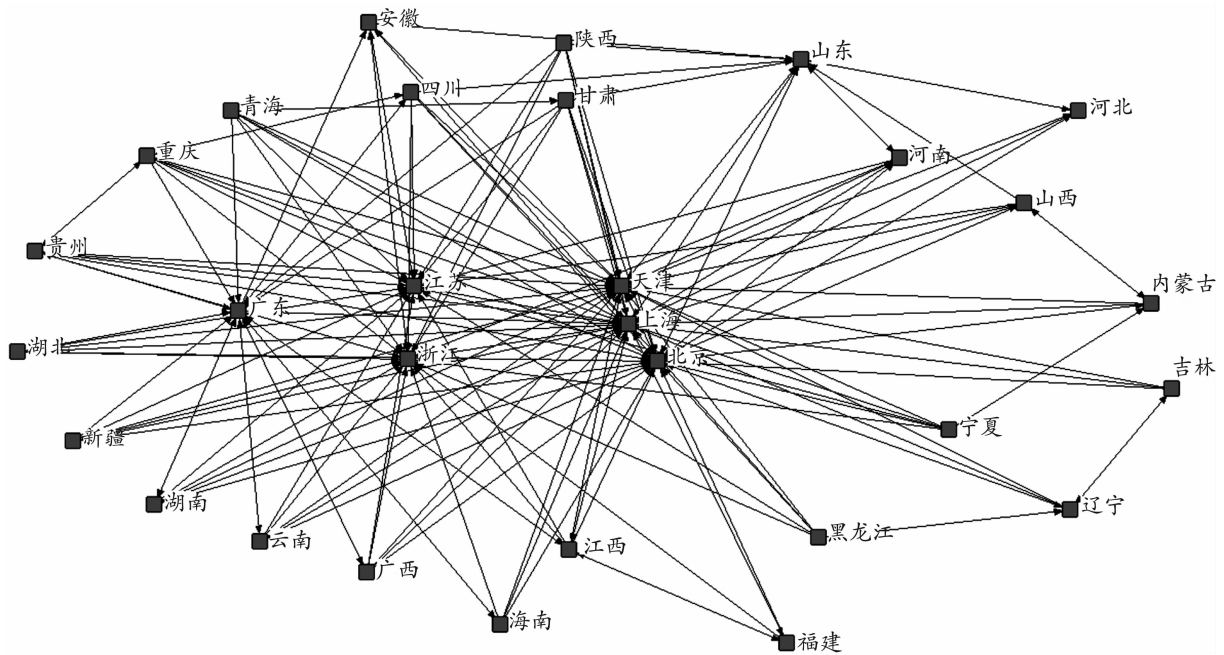


图2 2008年碳排放量的空间关联网图

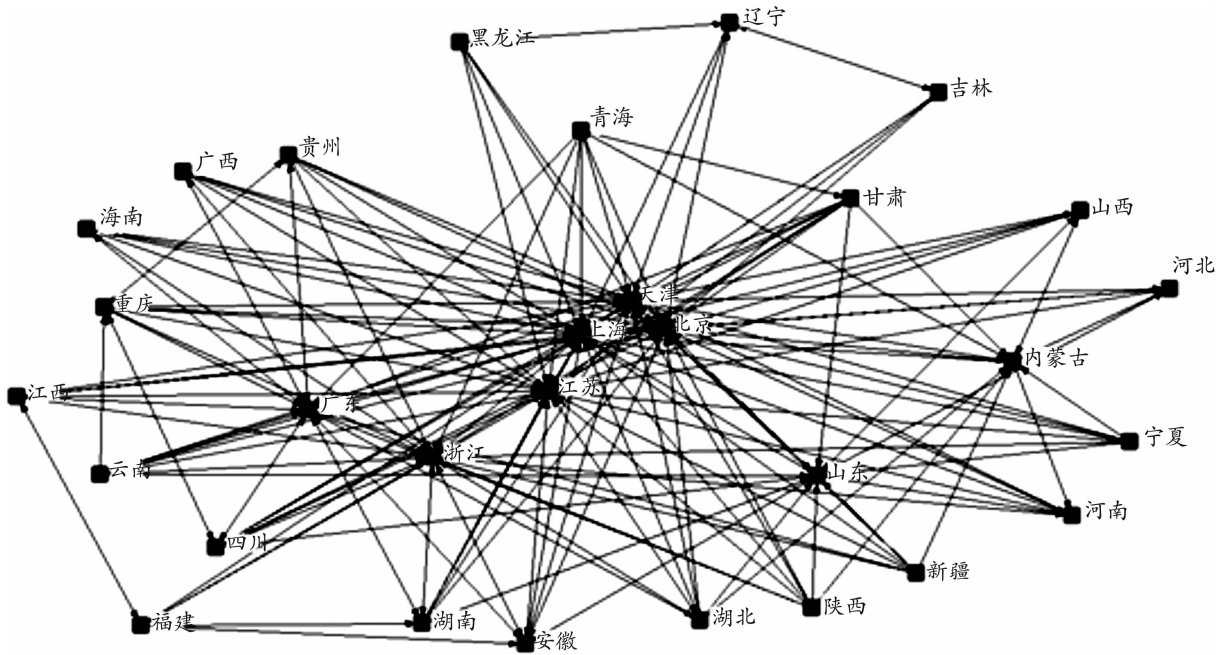


图3 2011年碳排放量的空间关联网图

(1) 网络密度与网络关联关系

由图5,在碳排放网络中,实际网络关系数在样本期内呈现上升趋势,2012年达到196个,且2010年以后趋于平稳,平均实际网络关联关系为179个,与之对应的网络密度也呈现增长趋势,从2005年0.179上升到2012年的0.225。网络密度的增加说明网络中各省份的碳排放空间关联越来越密切。究其原因,可能与我国2000年以后的能源跨区调配(西气东输、北煤南运等)以及产业集聚化生产有关,能源的跨区流动和产业的集聚必然会促进碳排放空间上的关联性。

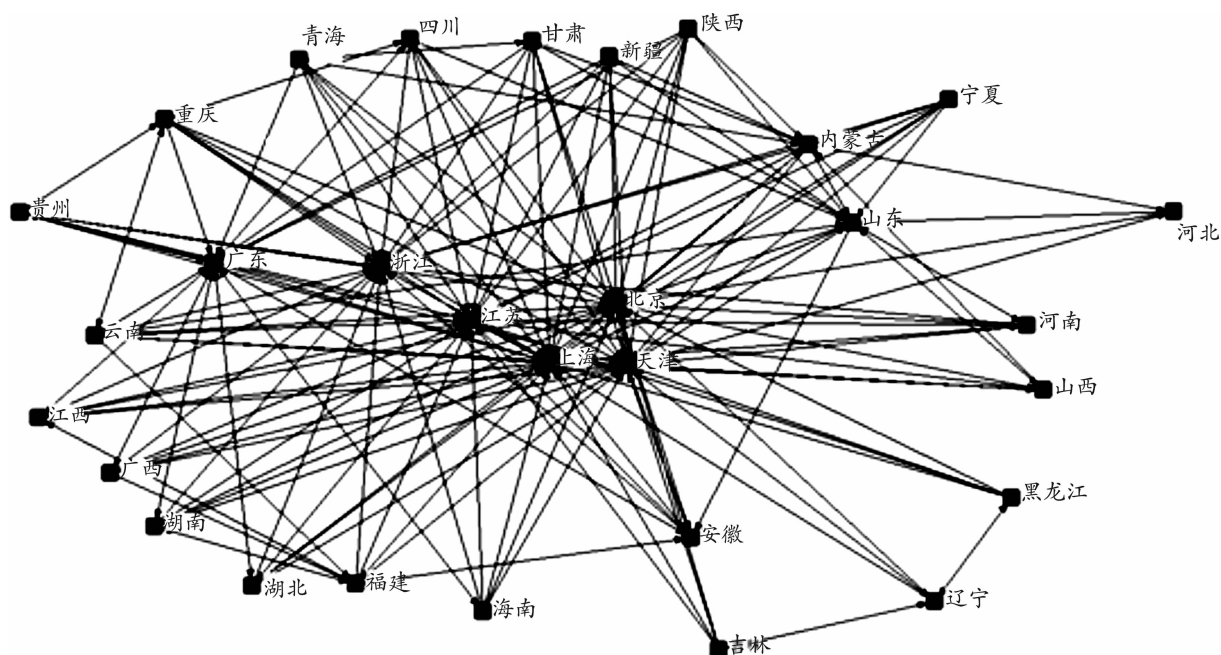


图4 2012年碳排放量的空间关联网络图

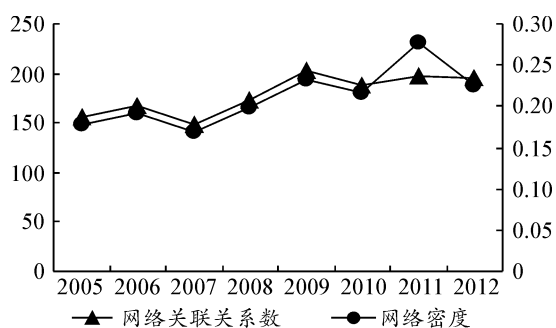


图5 碳排放量网络的网络关联系数与网络密度

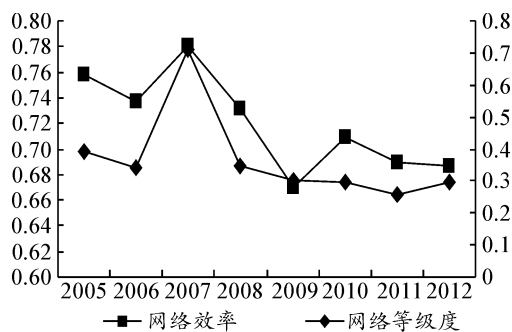


图6 碳排放量网络的网络效率与网络等级度

虽然样本期间内网络密度呈上升趋势,但关联关系数目最大值为203个(2009年)与最大可能的空间关联关系数目^①相差还很大,促进碳排放空间关联性的空间还很大。“十二五”规划以来,我国将建立碳排放交易市场作为一项重要的工作,随着该市场的建立将会在一定程度上促进碳排放的空间关联。此外,随着网络密度的不断提升,网络中的冗余连线增多,一旦达到或超过网络的容纳能力,将会增加网络中碳排放量流动的交易费用,降低碳排放效率,对碳排放分配产生抑制。因此,需要将网络密度控制在合适水平才能保证碳排放量的空间优化配置。

(2) 网络等级度与网络效率

网络关联度、网络等级度和网络效率可以反映一个网络的关联性。样本期间内我国省际碳排放网络的网络关联度为1,表明区域之间碳排放量的联系较为紧密,存在着明显的空间关联和空间溢出。由图6,网络等级度和网络效率除部分年份增加外,整体为下降趋势。2007-2008年的网络等级度大幅下降,表明碳排放网络的相互影响逐步增强,网络中各省份联系密切,此后趋于平缓,表明网络结构较为稳定。2007-2009年网络效率值也大幅度下降,说明网络中的连线增多,网络中省份的碳排放联系更加的密切,且网络的稳定性也逐步提升。

①30个省份构成的碳排放量网络结构中,最大可能的空间关联关系数目: $30 \times 29 = 870$ 个。

综合这几个指标测算的结果,随着我国现代化和市场化进程的推进,我国能源市场不断完善,工业生产的集聚,这也意味着碳排放量在空间分布上联系密切,逐渐趋于稳定,随着我国碳排放交易市场的建立与完善,这种联系性会逐步加强。

2. 中心性分析

分别计算出各省份的度数中心度与中间中心度,对我国碳排放网络进行中心性分析,计算结果见表1。^①对于度数中心性,2005-2012年各省的度数中心度排名前三的省份是一致的(个别年份顺序有差异),依次为:上海、北京、天津;在2009年、2010年、2012年江苏排名第四,其余各年是浙江;对于2012年,超过均值的省份:上海、天津、北京、江苏、浙江、广东、山东、内蒙古。这些省份在碳排放网络中与其他省份关系数目较多,尤其是上海一直是排名首位,原因是上海的碳排放与其他26个省份存在受益关联关系,同时与7个省份存在溢出关联关系,上海处于我国碳排放空间关联网络的中心位置。除了内蒙古地区,其余省份位于沿海地区,说明沿海地区对整体的碳排放关联及溢出关系具有很强的影响力。样本期间内排名靠后的省份有:河北、黑龙江、吉林、山西、辽宁等,说明这些省份与其他省份之间关联关系较少,可能是由于所处的地理位置相对偏远,或者经济规模相对有限,从而导致与其他省份关联度较弱。一个省份的关联关系有两种,受益关联关系和溢出关联关系,若溢出关联关系数目大于受益关联关系,则表现为溢出,反之亦然;若两者相等,表明两种关系相当。度数中心度排名靠前的省份大部分位于沿海经济发达地区,这些省份的受益关联关系大于溢出关系,说明这些地区碳排放量大,侧面反映了能源消耗量大,对于其他省份的各种资源依存度高,其他省份的资源向这些地区进行流动并进行集聚化生产,从而表现为碳排放量的溢出。

对于中间中心性,2007年各省的中间中心度排名前三的省份为:北京、上海、天津;2012年为广东、上海、天津;其余年份为广东、上海、北京,可以观察到与度数中心度的结论基本相同,都属于东部地区,说明东部地区在碳排放网络中起着重要的“桥梁”和“中间”作用。经计算,2005-2012年中心度超过该年均值的省份均占该年总量的85%以上,且均在东部、中部较为发达地区,而每年排名后几位的省份中间中心度很低,基本上为0,这些省份大多处于西部、中部地区,这些省份经济由于地理位置、产业发展规模等原因,难以对其他省份产生控制作用。碳排放网络中各省份的中间中心度大小不一,存在非均衡的特征,说明我国

表1 省际碳排放量空间关联网络的中心性分析结果

省份	度数中心性			中间中心性
	点入度(受益关联关系数目)	点出度(溢出关联关系数目)	度数中心度	中间中心度
上海	26	7	89.655	128.109
天津	23	7	86.207	115.862
北京	22	7	82.759	53.578
江苏	22	5	75.862	53.608
浙江	19	3	65.517	15.490
广东	13	10	51.724	179.142
山东	12	7	48.276	34.970
内蒙古	7	7	44.828	5.656
重庆	3	9	31.034	3.000
福建	5	7	31.034	18.688
甘肃	1	8	31.034	0.250
云南	2	9	31.034	11.400
安徽	8	3	27.586	9.150
新疆	0	8	27.586	0.000
青海	0	8	27.586	0.000
陕西	0	8	27.586	0.000
四川	2	8	27.586	10.700
贵州	2	7	24.138	9.839
湖南	2	7	24.138	5.456
广西	1	7	24.138	1.372
江西	5	7	24.138	84.312
宁夏	0	7	24.138	0.000
河南	5	6	20.690	19.501
湖北	3	6	20.690	53.713
山西	3	6	20.690	7.761
海南	1	6	20.690	1.172
辽宁	3	5	17.241	57.603
吉林	1	5	17.241	0.333
黑龙江	1	5	17.241	0.333
河北	4	1	13.793	0.000
均值	7	7	35.862	29.367

^①由于篇幅原因,表1只报告2012年的结果,但后续分析是对于2005-2012年的分析。其他年份详细的计算结果可以随时向作者索取。

碳排放量的联系主要通过上海、北京、天津等几个经济发达地区来实现。

3. 块模型分析

通过块模型分析,可得到我国省际碳排放网络的空间聚类特征,得到四个碳排放板块,见表2。^①第一板块有4个省份:北京、天津、河北、山东;第二板块有4个省份:广东、上海、江苏、浙江;第三板块有8个省份:辽宁、吉林、内蒙古、甘肃、河南、宁夏、黑龙江、山西;第四板块有14个省份:新疆、湖南、湖北、福建、海南、广西、四川、重庆、贵州、陕西、云南、安徽、青海、江西。

由表2,可以反映这四个板块在碳排放空间关联网络的位置以及各板块的属性。2012年我国碳排放整体网络中存在196个关联关系,板块内部之间的关联关系为37个,板块外部之间的关联关系为161个,表明板块之间的碳排放具有显著的空间关联与溢出关系。第一板块的实际内部关系比例(47.83%)大于期望内部关系比例(10.34%),总溢出^②22个、总受益61个,板块外接收关系为51个、发出关系为12个;而第二板块的实际内部关系比例(20.00%)大于期望内部关系比例(10.34%),总溢出25个、总受益80个,板块外接收关系为75、发出关系为20。因此,由实际内部关系比例大于期望内部关系比例关系看两个板块属于“净受益”板块或者“双向溢出”板块,从板块外的接收、发出关系来看,第二板块接收程度大于第一板块,所以,第一板块属于“双向溢出”板块,第二板块属于“净受益”板块。第一板块的省份既发出联系同时也接受来自其他板块的联系;第二板块的省份主要接受其他省份的溢出,这些地区均属于江浙沪等沿海地区,主要接收其他省份碳排放量溢出,可能是由于接收外省能源较多或者吸收外部高碳产业生产。

表2 区域碳排放量空间关联板块的溢出效应^③

板块	接收关系数		发出关系数		期望内部 关系比例(%)	实际内部 关系比例(%)	板块属性
	板块内	板块外	板块内	板块外			
第一板块	11	51	11	12	10.34	47.83	双向溢出板块
第二板块	5	75	5	20	10.34	20.00	净受益板块
第三板块	8	14	8	42	24.13	16.00	经纪人板块
第四板块	13	21	13	87	44.83	13.00	净溢出板块

第三板块的实际内部关系比例(16.00%)比例小于期望内部关系比例(24.13%),总溢出49个、总受益21个,板块外接收关系为14、发出关系为42;而第四板块的实际内部关系比例(13.00%)小于期望内部关系比例(44.83%),总溢出100个、总受益34个,板块外接收关系为21、发出关系为87,因此从板块内外接收和发出来看,因此,由实际内部关系比例小于期望内部关系比例关系看两个板块属于“经纪人”板块或者“净溢出”板块,从板块外的接收、发出关系来看,第四板块的总溢出和板块外发出关系大于第三板块,所以第三板块属于“经纪人”板块,第四板块属于“净溢出”板块。第三板块作为“经纪人”角色,既接收其他板块中省份的溢出,同时也对外部省份发出关系,在整体网络中充当“桥梁”的中介作用;第四板块主要是对其他板块产生溢出效应,这些板块大部分是内陆地区,有些是偏远地区,但是资源相对丰富,各种能源的输出以及产业的外部转移,引起碳排放量的溢出。

为了考察板块之间碳排放量的关系,根据表2计算板块的网络密度矩阵,见表3。2012年的整体网络密度为0.225,如果板块的密度大于0.225,说明该板块的密度大于总体网络的密度水平,那么这个板块具有集中趋势,此时赋值为1;反之赋值为0,根据这个规则,可以得到像矩阵,如表3所示。像矩阵可以直观地反映碳排放在各板块间的溢出效应,清晰地考察各省份之间碳排放流动的传导机制。由像矩阵,第一板块和第三板块不仅在自己的板块内部存在碳排放的关联关系,而且还接收来自第三、第四板块的溢出,说明经

^①由于我国碳排放空间网络板块在样本期间变化不大,故表2只报告了2012年结果,其他年份的详细结果可随时向作者索取。

^②总溢出和总受益是根据表1整理得到,总溢出对应受益关联关系数目,总受益对应溢出关联关系数目。

^③表2中,期望内部关系比例=(板块内部省份个数-1)/(网络中所有省份个数-1);实际内部关系比例=板块内部关系数/板块溢出关系总数。

济相对发达的地区,碳排放量比较大,这些地区往往产业集聚化生产、能耗也较大,需要来自其他资源丰富省份在能源上的输入,因此表现为其他省份的碳排放量的溢出。第三板块和第四板块一般都是石油、煤、天然气储备丰富的地区,这些地区经济发展相对缓慢,对于碳排放需求不是很大,所以表现为对其他板块的溢出。此外,第一板块与第二板块内部之间也存在着溢出,表明我国省际碳排放关联网络中各板块联系紧密,各板块都能发挥出自我优势,全国一盘棋。

表3 区域碳排放量空间关联板块的密度矩阵和像矩阵

板块	密度矩阵				像矩阵			
	第一板块	第二板块	第三板块	第四板块	第一板块	第二板块	第三板块	第四板块
第一板块	0.833	0.063	0.250	0.054	1	0	1	0
第二板块	0.000	0.417	0.063	0.321	0	1	0	1
第三板块	0.688	0.625	0.125	0.000	1	1	0	0
第四板块	0.518	0.964	0.036	0.071	1	1	0	0

(三) 区域碳排放量空间关联影响因素的 QAP 回归分析

在分析我国省际碳排放空间关联网络特征及传导机制后,进一步研究哪些因素会影响或者决定省份碳排放空间关联性,采用社会网络的矩阵(QAP)回归分析方法。

1. 模型的假定与指标选择

根据现有文献,大部分文献运用空间计量经济学方法探究我国省际碳排放量的影响因素,均表明碳排放量受到地理因素的影响。因此,相邻的省份之间由于地理位置优势,可能更具有显著的空间关联性和溢出效应。从块模型的分析来看,各板块间具有明显的溢出传递性,东部地区与西部地区既存在直接溢出也存在间接的溢出。因此,区域之间的碳排放量溢出可能与各地区发展方式有关系,可以通过度量各地区的经济发展差异来研究我国省际碳排放的空间关联性。选择能源消耗、产业结构、消费水平、城镇人口指标来间接刻画各地区的综合发展差异,各指标分别选择单位 GDP 耗能、第三产业总产值占 GDP 比重、居民消费支出占 GDP 比重、城镇人口比重来度量。

综上所述,理论上的假设:中国省际碳排放的空间关联 T 的影响因素分别为由于地域位置所决定的空间邻接关系 D ,能源消耗差异 E ,产业结构差异 I ,消费水平差异 S ,城镇人口差异 P ,可设定模型的表达式,见式(4):

$$T = f(D, E, I, S, P) \quad (4)$$

式(4)中, T 、 D 、 E 、 I 、 S 和 P 为关系矩阵; T 表示碳排放的空间关联矩阵; E 为空间邻接矩阵,两地区相邻则为1,否则记为0;能源消耗差异 E 、产业结构差异 I 、消费水平差异 S 和城镇人口差异 P ,分别取各省市对应指标的在样本期间的平均值,然后利用各省市对应指标的绝对差异建立差异矩阵。由于在实证过程中,回归的变量均是表示两两地区的关系矩阵,因此不能用一般的统计检验方法来检验变量之间是否存在关系,选择社会网络常用的非参数方法:QAP 相关性分析和 QAP 回归分析。

2. QAP 相关性分析

QAP 相关性分析通过比较两个方阵中每个格值之间的相似性,以矩阵置换为基础、重复抽样计算出相关系数并进行非参数检验(Everett, 2002)。选择10000次随机置换得到碳排放空间关联矩阵与影响因素的 QAP 相关性分析结果,见表4。相关系数表示被解释变量(碳排放的空间关联关系)和解释变量(空间邻接关系、能源消耗差异、产业结构差异、消费水平差异、城镇人口差异)的关系矩阵之间实际观测到的相关系数,相关系数绝对值越大说明对应的解释变量对空间碳排放关联网络的影响越大。相关系数均值是10000次随机置换计算的实际相关系数的均值;最大值、最小值是10000次随机置换的实际相关系数中的最大值、最小值; $P \geq 0$ 、 $P \leq 0$ 分别表示10000次随机置换中观测到的相关系数大于等于、小于等于实际相关系数的概率。

表4 空间关联矩阵 T 与影响因素的 QAP 相关性分析结果

变量名称	相关系数	显著性水平	相关系数均值	标准差	最小值	最大值	$P \geq 0$	$P \leq 0$
D	0.210	0.000	-0.000	0.044	-0.066	0.188	0.000	1.000
E	-0.080	0.020	-0.002	0.059	-0.135	0.196	0.930	0.070
I	0.170	0.015	-0.001	0.065	-0.106	0.235	0.095	0.905
S	0.106	0.008	0.000	0.059	-0.133	0.195	0.008	0.992
P	-0.050	0.003	0.001	0.056	-0.137	0.194	0.808	0.192

由表4结果,各省市的地理邻接关系、消费水平、城镇人口与碳排放的空间关联的相关系数在1%的水平上显著,能源消耗、产业结构与碳排放的空间关联的相关系数在5%的水平上显著,且能源消耗、城镇人口与碳排放的空间关联的相关系数为负,说明这两个指标的地区相近性是产生碳排放空间关联关系和空间溢出效应的重要影响因素。地理邻接关系、产业结构、消费水平对碳排放的空间关联有正向影响。更进一步,对于这五个解释变量进行 QAP 相关性分析,相关系数和显著水平见表5。

表5 影响因素的 QAP 相关性分析结果^①

变量名称	D	E	I	S	P
D	1.000***	-0.153***	-0.094**	-0.145***	0.084**
E	-0.153***	1.000***	0.037	0.125	-0.125*
I	-0.094**	0.037	1.000***	-0.087	0.066
S	-0.145***	0.125	-0.087	1.000***	-0.107
P	0.084**	-0.125*	0.066	-0.107	1.000***

由表5,地理邻接关系与其他变量均有显著相关关系,能源消耗与城镇人口的相关系数在10%的水平上显著,故这五个解释变量对于碳排放的空间关联关系的影响可能存在“多重共线性”问题,这也是关系数据的特点,需要采用 QAP 方法进行回归,该方法可以较好地处理回归中自变量之间重叠性的问题。

3. QAP 回归分析

QAP 回归分析是研究解释变量和被解释变量均是矩阵的回归方法,基本过程分两步:首先,对于解释变量矩阵和被解释变量矩阵对应的长向量矩阵进行普通多元回归分析;其次,对解释变量矩阵和被解释变量矩阵的各行各列同时做随机置换,接着对置换后的矩阵再次回归,并记录所有待估参数的估计值和判定系数 R^2 。重复这两步,得到估计统计量的标准误,然后进行类似于 QAP 相关性分析的参数估计和检验。选择10000次随机置换,得到我国碳排放空间关联与影响因素的 QAP 回归结果,调整后的 R^2 为0.461,说明这五个解释变量矩阵可以解释我国省际碳排放空间关联关系的46.1%,且通过了1%的显著性水平检验,^②样本体积为870。^③解释变量和截距项的回归估计值及相关性检验见表6,概率1、概率2分别表示随机置换过程中回归系数大于等于、小于等于最终回归系数的概率。

表6 碳排放空间关联影响因素的 QAP 回归分析结果

变量名称	非标准化回归系数	标准化回归系数	显著性概率值	概率1	概率2
截距项	-0.0054	0.0000			
D	0.2012	0.1717	0.000	0.000	1.000
E	-0.0169	-0.0265	0.031	0.700	0.301
I	0.0521	0.0112	0.066	0.534	0.466
S	0.0635	0.0165	0.082	0.639	0.362
P	-1.5025	-0.4653	0.000	0.418	0.973

由表6,空间邻接关系矩阵 D 的回归系数在1%的水平上显著,说明地理位置的相邻确实对碳排放的空间关联和空间溢出产生重要的作用;能源消耗差异矩阵 E 的回归系数在5%的水平上显著,说明省份之间能源消耗的差异对碳排放空间关联和溢出产生重要影响,并且回归系数值为负,说明区域的能源消耗相

①注:表中***,**, *分别表示在1%,5%,10%显著性水平下显著

②随机置换产生的判定系数不小于实际观察到的判定系数的概率,根据单尾检验的概率值为0得到该结论。

③30个省份构成了30*30的矩阵,忽略对角线元素,剩下30*(30-1)=870个观测值。

似性越高, 省份之间碳排放的空间关联和溢出越大; 产业结构差异矩阵 I 、消费水平差异矩阵 S 的回归系数在10%的水平下显著, 说明产业结构差异、消费水平差异在一定程度上也影响着碳排放的空间关联关系, 回归系数值为正, 说明区域间产业结构和消费水平差异越大, 省份之间碳排放的空间关联和溢出越大; 城镇人口差异矩阵 P 的回归系数在1%的水平上显著, 说明城镇人口差异对碳排放空间网络关系产生重要影响, 且区域之间越相似, 这种影响程度越大。

五、结论、建议与展望

本文基于社会网络分析方法(SNA)探究了中国省际碳排放的空间关联性和影响因素。通过修正的引力模型构造省际碳排放的空间关联矩阵, 并以此为基础研究碳排放空间网络的整体网络特征、网络中心特征和空间聚类特征, 以及传导机制, 最后运用 QAP 回归分析对碳排放空间关联的影响因素做回归分析, 得到如下结论:

第一, 从整体网络结构特征看, 样本期间内, 中国碳排放空间网络在网络关联系数的均值为197个, 呈上升趋势; 与之对应的网络密度也呈现增长趋势, 从2005年0.179上升到2012年的0.225; 网络关联度为1, 表明区域之间碳排放量的联系较为紧密, 存在着明显的空间关联和空间溢出; 网络等级度和网络效率除部分年份增加外, 整体为下降趋势。

第二, 从网络各个节点特征角度, 2005-2012年各省的度数中心度排名前三的省份为: 上海、北京、天津, 排名靠后的省份有: 河北、黑龙江、吉林、山西、辽宁等; 碳排放网络中各省份的中间中心度大小不一, 存在非均衡的特征。

第三, 空间聚类特征(块模型)显示, 第一板块: 北京、天津、河北、山东4个省份为双向溢出板块; 第二板块: 广东、上海、江苏、浙江4个省份为净受益板块; 第三板块: 辽宁、吉林、内蒙古、甘肃、河南、宁夏、黑龙江、山西8个省份为经纪人板块; 第四板块: 其余省份构成净溢出板块。第一板块和第三板块不仅在自己的板块内部存在着碳排放的关联关系, 而且还接收来自第三、第四板块的溢出, 第一板块与第二板块内部之间也存在着溢出, 我国省际碳排放关联网络中各板块联系紧密, 各个板块构成一盘棋。

第四, 由 QAP 回归分析结果, 空间邻接关系、能源消耗差异、产业结构差异和城镇人口差异对中国碳排放空间关联关系产生显著的影响; 产业结构差异和消费水平差异在一定程度上也影响着该网络关联关系; 区域间能源消耗和城镇人口相似性越高, 省份之间碳排放的空间关联和溢出越大。

根据上述结论, 本文提出如下政策建议:

一是针对我国省际碳排放的空间网络结构和特征, 从空间整体上把握碳排放的流动性和传导机制, 跨区调配碳排放量指标, 全面实现协同减排计划。随着我国碳排放交易市场的建立和完善, 省际之间碳排放的关联性也逐年增强。因此, 在制定减排计划时, 需要充分考虑各地区之间的关联关系, 分别从宏观和微观层面解决碳排放量的优化配置问题。上海、北京、天津等经济发达地区处在网络的中心位置, 属于“双向溢出”板块, 这些省份对于新疆、山西等资源丰富地区的碳排放量依存度较高, 在整个碳排放网络中承担着板块内和板块间的“桥梁”作用, 侧面反映了这些地区与其他省份在经济、能源上联系紧密, 对碳排放的需求量较高。因此, 可以通过高碳产业转移的方式, 建立“卫星式”产业链, 解决部分地区高碳排放问题。江浙沪等沿海地区为“净受益”板块, 这些地区经济发展迅速, 人口和产业密集, 对于碳排放的需求在整个网络中较高, 碳排放量大, 这些地区也可以采用产业转移方式缓解高碳排放问题。对于资源丰富地区的“净溢出”角色, 这些地区大部分为偏远地区, 经济发展相对缓慢, 碳排放在网络中呈现明显的溢出效应, 对于碳排放量的需求不高。因此, 可以通过引进经济发达地区的高碳产业, 就近生产, 平衡部分地区碳排放过高的问题。东北地区及部分中西部地区为“经纪人”板块, 这些板块与其他板块联系较为密切, 这些地区应保持“中间”人作用, 使得碳排放在网络中得以传递和流动。

二是不断优化我国碳排放空间网络, 逐步达到地区碳排放的均衡性, 实现均衡减排。针对我国碳排放板块“全国一盘棋”的特征, 东都地区和西部地区存在着碳排放的直接溢出和间接溢出性质, 制定相应的减排计划, 在实施能源上的“南煤北运”、“西气东输”时, 综合考虑能源转移成本和产业转移成本, 既要保

证沿海经济发达地区在能源上和碳排放量上的需求,也要考虑高度碳排放所带来的生态问题 and 经济成本。

三是缩小地区综合发展水平,实现全国各省碳排放的均衡性和公平性。由 QAP 回归分析结果看,空间邻接关系、能源消耗差异、产业结构差异、消费水平和城镇人口差异对中国碳排放空间关联关系产生显著的影响;空间邻接关系的影响表现为“近水楼台先得月”特征,地区相邻碳排放溢出也明显。因此,需要从综合发展角度考虑,不断缩小地区间的经济、能耗等差异,可以通过区域间低碳技术交流、产业转移和人口计划等来实现,不断完善我国碳排放空间网络。对于高碳排放产业,可以通过提高“准入门槛”,不断淘汰落后高耗能产业;大力发展新能源产业,提高减排技术。

总之,对于我国碳减排工程,针对目前我国碳排放的空间网络特征,不能采取“一刀切”的政策,要采取弹性的制度,一方面,探寻区域之间碳排放关联的有效途径,减少碳排放量交易的壁垒,另一方面,缩小地区综合发展的差异性,实现经济发展“新常态”下,全国经济保持均衡发展,实现均衡减排。

最后需要特别说明,尽管本文选用 SNA 分析方法构建我国碳排放空间网络,但是研究是基于省际层面数据,若能获取我国各城市数据或者县域数据再进行复杂网络分析,这会让我们更加精准地分析地域之间的空间关联。此外,如果能把社会复杂网络与地理经济学相结合一起去探讨碳排放,更能综合地把握我国区域间碳排放的地域关系和网络关系。因此,在后续的研究中对于数据的调研和方法的改进方面,都是努力的方向。

参考文献:

- [1] JINJUN XUE, ZHONGXIU ZHAO, YANDE DAI, et al. Green Low-Carbon Development in China[M]. New York: Springer, 2013: 1-127.
- [2] ANGANG HU. China: Innovative Green Development[M]. New York: Springer, 2014: 79-126.
- [3] 杨骞, 刘华军. 中国二氧化碳排放的区域差异分解及影响因素——基于 1995-2009 年省际面板数据的研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2012(5): 36-49.
- [4] 仲云云, 仲伟周. 我国碳排放的区域差异及驱动因素分析——基于脱钩和三层完全分解模型的实证研究[J]. 财经研究, 2012, 38(2): 123-133.
- [5] 徐国泉, 刘则渊, 姜照华. 中国碳排放的因素分解模型及实证分析: 1995-2004[J]. 中国人口·资源与环境, 2006, 16(6): 158-161.
- [6] MAXIMILIAN A, CARSON R T. Forecasting the Path of China's CO₂ Emissions Using Province-level Information[J]. Journal of Environment Economics and Management, 2008, 55(1): 229-247.
- [7] SONG T, ZHANG T G, TONG L J. An Empirical Test of the Environmental Kuznets Curve in China: A Panel Cointegration Approach. [J]. China Economic Review, 2008(19): 381-392.
- [8] CHANG C C. A Multivariate Causality Test of Carbon Dioxide Emissions, Energy Consumption and Economic Growth in China[J]. Applied Energy, 2010, 87(11): 3533-3537.
- [9] CHOI Y, ZHANG N, ZHOU P. Efficiency and Abatement Costs of Energy-related CO₂ Emissions in China: A Slacks-Based Efficiency Measure[J]. Applied Energy, 2012, 98(5): 198-208.
- [10] WANG K, YI-MING WEI. China's Regional Industrial Energy Efficiency and Carbon Emissions Abatement Costs[J]. Applied Energy, 2014(130): 617-631.
- [11] 林柏强, 蒋竺均. 中国二氧化碳的环境库兹涅茨曲线预测及影响因素分析[J]. 管理世界, 2009(4): 27-36.
- [12] 张雷, 黄园渐, 李艳梅, 等. 中国碳排放区域格局变化与减排途径分析[J]. 资源科学, 2010, 32(2): 211-217.
- [13] 吴玉鸣. 中国省域碳排放异质性趋同及其决定因素研究——基于变参数面板数据计量经济模型的实证[J]. 商业经济与管理, 2015(8): 66-74.
- [14] 徐盈之, 王书斌. 碳减排是否存在空间溢出效应? ——基于省际面板数据的空间计量检验[J]. 中国地质大学学报, 2015(1): 41-50.
- [15] 马大来, 陈仲常, 王玲. 中国省际碳排放效率的空间计量[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(1): 67-77.
- [16] FAGIOLO G, REYES J, SCHIAVO S. International Trade and Financial Integration: A Weighted Network Analysis[J]. Quantitative Finance, 2010(10): 389-399.

(下转第 78 页)