

长江经济带 SO₂ 排放网络结构特征及其影响因素

陈蕴恬^{1,2} 葛察忠² 段显明¹

(1. 杭州电子科技大学, 浙江杭州 310018;

2. 环境保护部环境规划院, 北京 100000)

【摘要】: 基于 SNA 及 QAP 回归分析法, 构建改进的引力模型, 对我国长江经济带省市间 SO₂ 排放的空间网络特征及其影响因素进行研究。结果表明: (1) 2005—2013 年, 长江经济带的 SO₂ 排放空间关联网络密度逐年增强, 且中下游密度明显高于上游地区; (2) 江苏、浙江、安徽等省市在 SO₂ 排放关联网络中既处于核心位置, 又对其他省市的资源有所依赖。湖南、重庆这两个省市在 SO₂ 排放网络中起若“中介”作用; (3) 长江经济带内 SO₂ 的溢出常发生在中下游省市内部、上游省市内部, 且中下游省市对上游省市的溢出效果要高于上游省市时中下游省市的溢出效果; (4) 区域间空间邻近关系与环境规制差异时长江经济带 SO₂ 排放空间关联与溢出都有影响, 且不同的环境规制代理变量的影响效果不同。最后, 就实证结果给出相应政策建议。

【关键词】: 社会网络分析; 长江经济带; QAP 方法; 空间关联关系

【中图分类号】: F062.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671—4407(2017) 04-143-06

随着我国工业化与城市化的不断发展, 我国的空气污染状况不容乐观。纵观学术界对于区域间大气污染溢出问题的研究, 侧重于两个方面: 一是从自然科学的角度, 研究气象等自然因素对于污染物跨区域传输特征的影响, 如薛文博、付飞等^[1]基于 CAMX、空气质量模型的颗粒物来撤追踪技术 (PSAT) 定量模拟了全国 PM_{2.5}, 及其化学组分的跨区域输送规律; 二是从社会科学的角度, 研究社会经济活动等人为因素对于污染物溢出的影响, 如众多学者发现我国各省份存在资源禀赋、能源利用、经济发展水平各异的空间差异^[2-3], 环境污染易呈现出较为明显的空间相关、空间集聚及空间溢出等特征^[4-7]。空间因素近年来被纳入污染物排放影响因素的分析中, 然而大多数的空间计量方法检验空间关联只局限于“相邻”或“邻近”地区, 多研究“属性数据”而非“关系数据”, 得到的结论较为局限; 此外, 还忽略了污染物空间关联复杂而又多线程的网络化特征, 很少有人从区域帷体上探究污染物排放空间的关联关系、结构及空间传导机制等。社会网络分析 (social network analysis, 简称 SNA) 恰好可以突破传统属性数据”的研究, 将区域间的污染联系看成一个社会网络, 通过对“关系数据”的系统分析来考察网络关系及其特征^[8]。因而, 本文将从“社会关联”的角度构建污染物溢出的网络结构, 分析网络特征及其影响因素。

SO₂ 是酸雨的主要前体物, 经化学转化形成硫酸盐还会引起区域范围 PM_{2.5} 污染, 是我国现阶段大力控制的主要大气污染物^[9]。大量的环境监测资料显示, 由于大气层中的酸性物质增加, 酸雨已经覆盖了我国四川、贵州、广东、广西、湖南、湖北、江西、浙江、江苏和青岛等多个省市, 且这些省市多位于长江经济带地区, 2013 年长江经济带 11 省市 SO₂ 排放量共计 7064524 吨, 占全国总量的 34.6%。长江经济带作为国家级重大发展战略, 理盖了我国沪、苏、浙、皖、徐、鄂、湘、渝、川、贵、云等 11 省

¹第一作者简介: 陈蕴恬 (1992—), 女, 江苏宜兴人, 硕士生。研究方向为环境经济学。E-mail: 1632486145@qq.com

通讯作者简介: 葛察忠 (1965—), 男, 浙江开化人, 研究员, 研究方向为环境政策、环境经济手段、环境管理等。E-mail: gecz@caep.org.cn

市，横跨长三角城市群、长江中游城市群和成渝城市群。面积约 205 万平方千米，人口和生产总值均超过全国的 40%。改革开放以来，长江经济带已发展成为我国综合实力最强、战略支撑作用最大的区域之一，极具竞争力与发展潜力。2016 年 3 月 25 日中共中央政治局召开会议审议通过《长江经济带发展规划纲要》，会议指出“长江经济带发展的战略定位必须坚持生态优先、绿色发展，共抓大保护，不搞大开发”。虽然近年来沿江省份社会经济实现了较快发展，综合实力位于全国前列，但作为一个包含 9 省 2 市的巨型区域，内部不同省市间的资源禀赋与经济发展状况差异较大，生态退化及环境污染问题显著。

基于此，本文将以长江经济带 9 省 2 市为基本研究单位，利用修正的引力模型，结合社会网络分析方法对长江经济带 SO₂ 排放网络的空间结构特征进行研究，并通过 QAP 回归分析方法检验 SO₂ 空间排放关联与溢出的影响因子，以为长江经济带制定 SO₂ 减排计划提供相应的政策建议。

1 研究方法数据来源

1.1 改进的引力模型构建

本文是针对长江经济带省际间的 SO₂ 空间溢出状况进行分析，可看成是 SO₂ 在省市空间上发生的一种相互影响的关系。结合其他学者的研究，构建空间关联网的方式，主要有 VAR 模型和引力模型^[10]。本文选择引力模型构建环境污染溢出矩阵的主要原因是：一方面，引力模型更适用于环境污染总量数据，在展示空间动态演变趋势时更具优势；另一方面，VAR 模型对滞后阶数的选择较敏感，会在某种程度上降低溢出关系刻画的精确性^[11]。引力模型是以牛顿经典力学的万有引力模型为基础，后经 Tinberg 即和 Poyhonen 等人在经济学领域进行了发展和延伸，提出的一个比较完整且便捷的经济学模型。作为一种分析和预测空间相互作用的数学方法，引力模型多数被拓展运用于区域间经济联系^[12-13]、旅游^[14]、贸易^[15]和人口迁移^[16]等方面，均取得了有益的研究成果。而用于环境溢出关系的研究则较少。本文将借鉴刘华军、刘传明^[11]在研究我国省际间环境污染空间溢出时所构建的引力模型，测算长江经济带省市间 SO₂ 污染的引力矩阵。具体计算公式见式（1）。

$$R_{ij} = K_{ij} * (\sqrt{P_i G_i Q_i} \sqrt{P_j G_j Q_j}) / D_{ij}^2$$

$$K_{ij} = P_i / (P_i + P_j) \quad (1)$$

式（1）中： R_{ij} ，表示地区 i 对地区 j 的 SO₂ 排放引力； K_{ij} 为地区 i 对地区 j 的 SO₂ 排放联系贡献率； P_i 、 P_j 分别为两地区的 SO₂ 排放量， G_i 、 G_j 分别为两地区的地区生产总值； Q_i 、 Q_j 分别为两地区的年末人口数； D_{ij} 为两地区的空间距离。

1.2 网络分析的指标选取

为了更好地描述 SO₂ 空间关联关系的网络结构特征，在此选用社会网络分析方法，在计量 SO₂ 排放网络结构特性时，将用到网络密度、网络中心性和核心—边缘结构这几个指标。

（1）网络密度。网络密度是指网络中各省市 SO₂ 排放的紧密程度。联系紧密的整体网络不仅为各省市提供各种社会资源，同时也成为限制其发展的重要力量，因此并非是整体密度越大越好。公式为：

$$D = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k d(n_i, n_j)}{k(k-1)} \quad (2)$$

式中：D 为网络密度；k 为省市数； $d(n_i, n_j)$ 为省市 n_i 、 n_j 之间的关系量。

(2) 网络中心性。网络中心性用来衡量某一省市在网络中的中心性位置或特权性等，在分析网络中心性时将用到度数中心度和中间中心度。

度数中心度可以反映哪些省市在网络中处于中心地位。当整体网络为有向网络时，则把点度中心度分为点入度和点出度进行分析。点入度可表示某省市在整体网络中多大程度受其他省市的影响；点出度则反映该省市在此网络中的辐射作用。通过分析某个省市的点入度与点出度，基本可以初步反映出它在该整体网络中的贡献作用。其公式为：

$$C_{D(in)}(n_i) = \sum_{j=1}^n R_{ji}(n_i); C_{D(out)}(n_i) = \sum_{j=1}^n R_{ij}(n_i) \quad (3)$$

式中：\$C_{D(in)}(n_i)\$ 为点入度，\$C_{D(out)}(n_i)\$ 为点出度，\$R_{ij}\$ 为联系强度。

中间中心度表示某省市在多大程度上是网络中其他省市的中介，它测量的是单独一个省市的控制优势，若一个省市的中间中心度越小，表示该省市对其他省市完全的控制能力越弱，处于网络的边缘；若一个省市的中间中心度越大，表示该省市对其他省市控制能力越强，处于网络的核心，拥有很大权力。其公式为：

$$C_B(n_i) = \sum_{j < k} g_{jk}(n_i) / g_{jk} \quad (4)$$

式中：\$C_B(n_i)\$ 为中间中心度；\$g_{jk}\$ 是省市 \$j\$ 到省市 \$k\$ 的捷径数。

(3) 核心—边缘结构。以核心和边缘作为基本的结构要素，核心区省市与边缘区省市存在一定的控制与依赖关系，处在核心区的省市间 \$SO_2\$ 排放量空间联系程度较高；处在边缘区的省市则在硫排放网络中联系程度较低。

1.3 计量模型构建

\$SO_2\$ 溢出网络结构的形成与发展是省市间各种驱动因子相互作用产生的效果，通过调节驱动力度，可对网络内部结构进一步重组并优化。借鉴已有研究，发现环境规制的区域差异、地理因素都对环境污染空间溢出产生了重要影响。一方面环境规制在地区间差异越大，环境规制的竞争就越强，环境污染空间溢出的关系也越多；另一方面地理位置邻近的地区通常联系更为紧密，地理位置相邻的省份环境污染溢出的关系会越强^[11]。基于此，本文将分别选用费用型、投资型、控制型环境规制指标^[17]作为环境规制的代理变量，构建如下模型：

$$T = f(X_1, X_2) = f(S, I, E, D) \quad (5)$$

式 (5) 中：模型中自变量均为省市间差值，\$X_1\$ 代表环境规制变量，\$X_2\$ 代表地理邻近变量。\$X_1\$ 中费用型环境规制变量用排污收费占工业增加值的比重 \$S\$ 表示，投资型环境规制变量用污染治理投资占地区生产总值的比重 \$I\$ 表示，控制型环境规制变量用能源强度 \$E\$ 表示，即用能源消费总量占地区生产总值的比重表示，且分别选取各省市对应指标的绝对差值建立差异矩阵。\$D\$ 为两省市空间邻近关系，相邻记为 1，反之为 0。

由于在实证分析过程中用到的数据为两两省市间的关系数据，而传统的计量检验往往要求各个变量间相互独立，否则易产生多承共线性，导致难以区分每个解释变量的单独影响，产生有偏估计。故本文选用社会网络常用的非参数方法（QAP 方法）进行分析，以满足对关系层次数据处理的要求。

1.4 数据来源

引力模型数据。改进的引力模型中地区生产总值来源于《中国城市统计年鉴（2006—2014年）》，地区的年末人口数来源于《中国统计年鉴（2006—2014年）》，SO₂排放量的数据来源于《中国环境统计年鉴（2006—2014年）》，空间地理数据为各省市省会城市的球面距离。QAP 回归分析数据。

QAP 回归分析中各省份排污收费、治污投资数据、工业增加值均来源于《中国环境统计年鉴（2014年）》《中国统计年鉴（2014年）》，而各省的能源消费总量数据来源于《中国能源统计年鉴（2014年）》。

2 实证分析

2.1 SO₂排放网络的特征分析

本文以长江经济带9省2市为研究边界，将其视为网络中的单独节点，节点间的连线用以表示区域间的网络关系。根据公式（1）修正的引力模型，计算不同省市间的SO₂排放联系值 R_{ij} ，进而构建省际间SO₂排放的空间关联矩阵，将关联矩阵二值化处理后，用以探究各省市空间SO₂排放的相互关系。在UCINET软件的辅助下，运用社会网络分析方法对选定的指标进行定量测算，分析SO₂排放网络的结构与特征。

2.1.1 整体网络密度及演变

图1展示了UCINET可视化工具Netdraw软件绘制的2005—2013年我国长江经济带省际SO₂排放的空间关联网络图，可见SO₂排放的网络化结构日趋复杂，同时区域内网络结构也存在一定的差异性，密集度：长江中下游网络>上游网络。从图2所示的网络密度来看，2005—2013年，长江经济带SO₂排放网络结构较为稳定，且密度逐年增加。2013年网络密度值为0.6091，属样本期内最高，表明区域内SO₂排放的空间联系在不断加强；图3所示的网络关联关系系数呈逐年增长趋势，数甩由2005年的42个上升至2013年的67个。需要注意的是，网络密度并非越大越好，SO₂排放的空间联系过于紧密，网络中的冗余连线将增多，一11—达到或超过网络的容纳能力，会造成严重的跨1必域空气污染问题。图3所示的网络关联关系系数与空间最大关联关系系数（11X10个）仍有差距，表明网络中各省份SO₂扩散与溢出的联系越来越强，但并非十分严重。究其原因可能是因为能源的跨区域流动、工业发展带来的产业转移使得长江经济带的SO₂排放网络联系紧密。

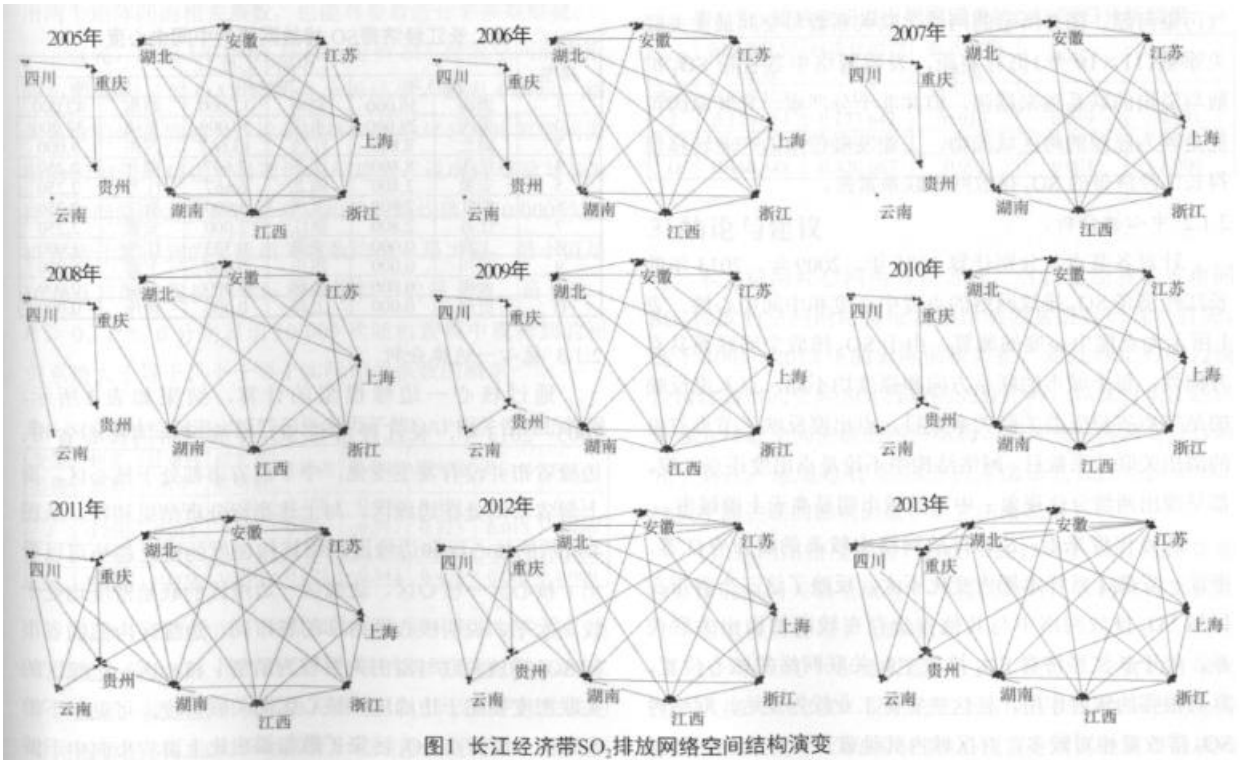


图1 长江经济带SO₂排放网络空间结构演变

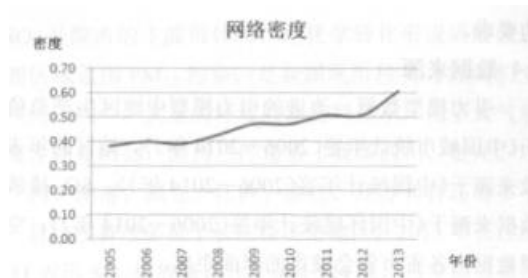


图2 长江经济带SO₂排放网络密度



图3 长江经济带SO₂排放网络关联关系系数

2. 1. 2 中心性分析

针对各节点，分别计算 2005 年、2009 年、2013 年的长江经济带 SO₂ 排放网络的点度中心度和中间中心性。表 1 所示为点度中心度的测算，由于 SO₂ 排放空间联系具有方向性，每个城市的联系方向和强度均不同，点入度反映的是节点省份受益关联关系数目，点出度反映了节点省份的溢出关联关系数目。网络结构中不论是点出度还点入度，都呈现出两级分化现象：中下游城市明显高于上游城市。

表1 长江经济带SO₂排放网络的点度中心度

排序	点出度(溢出关联关系数目)						点入度(受益关联关系数目)					
	2005年	2009年	2013年	2005年	2009年	2013年	2005年	2009年	2013年	2005年	2009年	2013年
1	江苏	6	湖南	7	江苏	6	江西	6	江苏	6	江苏	6
2	浙江	6	浙江	6	浙江	6	湖北	6	浙江	6	浙江	6
3	安徽	6	江西	6	安徽	6	湖南	6	安徽	6	安徽	6
4	上海	5	江苏	6	湖北	6	江苏	5	江西	6	江西	6
5	江西	5	湖北	6	湖南	6	浙江	5	湖北	6	湖北	6
6	湖北	5	安徽	6	上海	5	安徽	5	湖南	6	湖南	6
7	湖南	3	上海	5	江西	5	上海	3	上海	5	上海	4
8	重庆	3	重庆	3	重庆	3	重庆	3	贵州	4	重庆	3
9	四川	2	四川	3	四川	3	贵州	2	重庆	3	贵州	2
10	贵州	1	贵州	3	贵州	1	四川	1	四川	2	四川	1
11	云南	0	云南	1	云南	0	云南	0	云南	2	云南	1

从点出度来看, SO₂排放网络中较高的省市有江苏、浙自、安徽。且样本期内变化不大, 反映了这三个省市在区域 SO₂排放网络中与其他省份存在较高的溢出关联关系, 处于长江经济带 SO₂排放空间关联网络的核心位置, 具有很强的辐射作用, 且这些省份工业较为发达, 网络内 SO₂排放量相对较多。对区域内其他省市有一定的污染溢出; 而重庆、四川、贵州、云南样本期内点出度排名始终靠后, 说明这些省份与其他省份之间关联关系较少, 可能是由于所处地理位置相对偏远或经济规模、城镇化水平相对较低, 从而与区域内其他省市的关联度较弱。从点入度来看, SO₂排放网络中较高的省市有江苏、浙江、安徽、江西, 表明 SO₂排放网络中这些省份与其他地区有较高的受益关联关系, 受益关联关系较高反映了对其他省市的资源依存度较高, 其他省市的资源易向这几个省份流动并在这些地区进行产业集聚。

从中间中心度来看, 表2所示为长江经济带 SO₂排放网络的中间中心度, 选取2005年、2009年、2013年进行比较分析, 发现湖南、重庆这两个省份排名始终靠前, 说明这两个省市在 SO₂排放网络中起着重要的“中介”作用, 是连接长江上游省市与下游省市的桥梁与纽带, 在长江经济带 SO₂排放网络中占据重要的“经纪人”地位, 这一结果显然与长江经济带内部的地理区位相符。

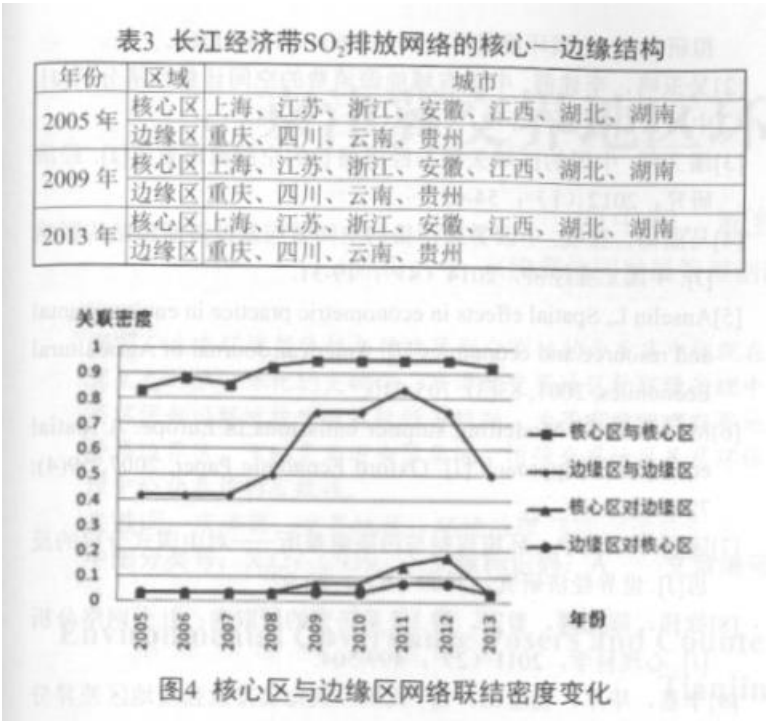
表2 长江经济带SO₂排放网络的中间中心度

排序	中间中心度					
	2005年	2009年	2013年	2005年	2009年	2013年
1	湖南	36.000	湖南	32.000	湖南	42.000
2	重庆	29.000	重庆	30.000	重庆	37.000
3	湖北	8.800	江西	13.667	四川	9.000
4	江西	8.800	江苏	7.667	湖北	2.250
5	安徽	2.800	湖北	6.667	江苏	2.250
6	浙江	2.800	贵州	5.000	浙江	2.250
7	江苏	2.800	浙江	2.000	安徽	2.250
8	上海	0.000	安徽	0.333	江西	1.000
9	四川	0.000	四川	0.000	上海	0.000
10	云南	0.000	云南	0.000	云南	0.000
11	贵州	0.000	上海	0.000	贵州	0.000

2.1.3 核心—边缘分析

通过核心——边缘模型的计算, 结果如表3所示, 2005—2013年, 长江经济带 SO₂排放网络的核心省市、边缘省市并没有发生变化, 中下游省市都处于核心区, 而上游省市均处在边缘区, 与上述指标分析结果相符。从图4所示的核心区和边缘区网络连接密度的变化趋势可以看出: 核心区——核心区、边缘区——边缘区的联结密度均处于较高水平, 说明核心区内部的省市间、边缘区内部的省市间 SO₂排放关联与溢出关系较为紧密; 核心区——边缘区的关联密度要高于边缘区——核心区的关联密度, 可见中下游省市向上游省市 SO₂污染扩散与溢出比上游省市向中下游省市的溢出更显著, 而边缘区与边缘区联结密度起伏较大,

2005—2011 年联结密度逐年上升，从 2012 年起又呈下降趋势，这一趋势与核心区对边缘区的联结密度变化相一致，反映了长江上游城市在样本期内 SO₂ 排放网络并不稳定，究其原因，可能是与 2012 年长江中下游城市对上游城市的 SO₂ 排放联系程度降低有关。



2. 2SO₂ 空间溢出的影响因子分析

二次指派程序（quadratic assignment procedure，简称 QAP）是对两个矩阵中各个对应值的相似性进行比较的一种方法。通过 QAP 方法对矩阵各个对应值进行比较，既能给出两个矩阵间的相关系数，也能对参数进行非参数检验。

首先，运用 UCINET 软件，分析 SO₂ 排放空间溢出矩阵与影响因子的 QAP 相关性分析结果，如表 4 所示，相关系数的绝对值越大，说明该解释变因对 SO₂ 排放空间溢出的影响作用越强；显著性水平越低，说明自变量与 SO₂ 排放空间溢出的关系越紧密；相关系数均值是 10000 次随机置换计算得到的实际相关系数均值；最大值、最小值是 10000 次随机跳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^[18]。

表4 SO₂排放空间溢出矩阵与影响因子的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	$P \geq 0$	$P \leq 0$
<i>S</i>	-0.013	0.534	-0.004	0.138	-0.400	0.451	0.569	0.534
<i>I</i>	0.250	0.013	0.000	0.121	-0.597	0.323	0.013	0.996
<i>E</i>	-0.398	0.003	0.001	0.126	-0.474	0.362	0.999	0.003
<i>D</i>	0.513	0.000	0.000	0.121	-0.343	0.474	0.000	1.000

从表 4 可以石出，各省市的控制型环境规制关系、地理邻近关系与 SO₂ 排放的空间关联的相关系数在 1% 的水平上显著，投

资型环境规制关系与 SO₂ 排放的空间关联的扣系数在 5% 的水平上显著。且地理邻近矩阵、投资型环境规制矩阵与 SO₂ 排放空间关联的相关系数为正值，控制型环境规制矩阵与 SO₂ 排放空间关联的相关系数为负值。说明控制型与投资型环境规制关系、地理邻近关系都对省市间 SO₂ 排放的空间溢出有影响，且从相关系数的绝对值大小来看，地理邻近关系的影响作用最强。而费用型环境规制与 SO₂ 排放的空间关联关系并不显著，说明长江经济带各省市排污收费差异与区域内 SO₂ 排放空间关联并没有太大关系。

其次，运用 QAP 回归分析，研究投资型差异矩阵、控制型差异矩阵、地理邻近矩阵和 SO₂ 排放空间关联的回归关系，并且对判定系数 R² 的显著性进行评价。运用 UCINET 软件，通过选择 10000 次随机置换，得到调整的裕为 0.409，说明这些变量可以解释长江经济带 SO₂ 排放空间溢出的 40.9%，调整的可决系数的概率值为 0，表明通过了 1% 的显著性检验，且样本体积为 110。

表 5 所示为长江经济带 SO₂ 排放空间溢出影响因素的 QAP 回归分析结果。空间邻近矩阵 D 在 1% 的水平上显著，且回归系数为正，说明地理上近邻效应对 SO₂ 排放空间关联具有显著的正向影响，地区相邻则 SO₂ 排放溢出明显；控制型环境规制与投资型环境规制差异矩阵在 5% 的水平上显著，控制型环境规制差异矩阵的回归系数为负，说明省市间的能源消耗差异越小，长江经济带省市间 SO₂ 排放的空间关联及溢出越显著；投资型环境规制差异矩阵的回归系数为正，说明省市间治污强度差异越大，长江经济带省市间 SO₂ 排放的空间关联及溢出越显著。

表5 SO₂排放空间溢出影响因素的QAP回归分析结果

变量	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	0.425 103	0	—	—	—
I	0.176 014	0.177 642	0.019	0.019	0.981
E	-0.379 326	-0.366 821	0.013	0.987	0.013
D	0.440 448	0.420 667	0.001	0.001	1.000

3 结论与建议

本文运用社会网络分析方法，对长江经济带省市间 SO₂ 排放的空间网络特征及其影响因素进行研究。首先，基于 2005-2013 年的省际面板数据，通过修正的引力模型构建省市间空间 SO₂ 排放的关联矩阵，以此对长江经济带 SO₂ 排放空间关联的网络结构、特征及网络演变进行研究；其次，运用 QAP 回归分析方法研究长江经济带 SO₂ 排放空间关联的影响因素。研究结果表明：

(1) 从网络密度来看，2005 — 2013 年，长江经济带的 SO₂ 排放空间关联呈现逐年增强的趋势，且网络内部长江中下游密度明显高于上游地区。

(2) 从点度中心度来看，江苏、浙江、安徽均有很高的点入度与点出度，说明这三个省市在长江经济带 SO₂ 排放网络中既处于关联网络的核心位置，对其他省市造成污染溢出效应，又对其他省市的资源有一定依存度，其他省份的资源易向这几个省份流动并在这些地区进行产业集聚。从中间中心性来看，湖南、重庆这两个省市在 SO₂ 排放网络中起着重要的“中介”作用。

(3) 从核心—边缘分析来看，2005 — 2013 年，长江经济带 SO₂ 排放空间关联网络的核心省市、边缘省市并没有发生变化，中下游省市始终处于核心区，而上游省市均处在边缘区；SO₂ 的扩散与溢出常发生在中下游省市内部、上游省市内部，且中下游省市对上游省市的溢出效果要高于上游省市对中下游省市的溢出效果。

(4) 从 QAP 回归分析来看，区域间空间邻近关系与环境规制差异对长江经济带 SO₂ 排放空间关联与溢出都有影响，且不同的环境规制代理变最的影响效果不同。地理邻近距离与投资型环境规制差异对长江经济带省市间 SO₂ 排放的空间关联及溢出有正向

影响,控制型环境规制关系则为负向影响。区域间空间距离越邻近、治污强度差异性越大、能源消费差异性越小,SO₂排放的空间关联及溢出越明显。

针对上述结论,本文提出以下建议:

充分考虑各省市间 SO₂排放的空间关联关系,跨区域调配 SO₂排放指标,合理制定长江经济带区域内协同减排计划。当下,供给侧改革政策为长江经济带优化产业结构布局、统筹协调保护与发展创造了有利契机。鉴于长江下游地区经济发展迅速,人口及产业密集,对于 SO₂排放的需求在整个网络中较高且 SO₂排放量较大,这些地区需要对一些传统高耗能、高排放行业进行转型升级、结构调整。而长江上游地区相对地理位置偏远,经济发展滞后,可以在控制总量的前提下,引进下游经济发达地区的部分产业,改善上游省市 SO₂对外扩散与溢出的状况。此外,还应充分利川湖南、重庆这两个省市在 SO₂排放网络中的“中介”与“桥梁”作用。从整体上把握好长江经济带区域内 SO₂排放的流动性及传导机制。

不断调整并优化长江经济带各省 SO₂排放的空间关联网络,构建网络一体化环境管理标准与制度,实现长江经济带省市间的污染治理联防联控。考虑到长江经济带省市间环境规制差异对 SO₂污染溢出影响显著,各省在制定环境规制政策时不仅要立足本省的经济环境状况,也应综合考虑挤个区域网络内各省市间的差距,避免环境规制逐底竞争而造成环境污染的空间溢出。在制定环境规制政策时,要将能源消费差异、治污投资差异考虑在内,各省市应协同加大环境污染治理投资的力度,且在多种政策运用时注意相互协调,既要保护本地区经济与环境的协调发展,也要保证整个长江经济带的可持续发展。

参考文献:

- [1] 薛文博,付飞,王金南.等.中国 PM_{2.5},跨区域传输特征数值模拟研究 IJI . 中国环境科学, 2014 (6) : 1361 — 1368 .
- [2] 吴玉鸣,李建霞.中国省域能源消费的空间计量经济分析[J] . 中国人口.资源与环境, 2012 (3) : 93 — 98 .
- [3] 潘文卿.中国的区域关联与经济增长的空间溢出效应 [J] . 经济研究, 20 12 (1) : 54 — 65 .
- [4] 马丽梅.张晓.中国雾霾污染的空间效应及经济能源结构影响 [J] . 中国工业经济. 2014 (4) : 19 — 31 .
- [5] Anselin L , Spatiale effects in econometric Practice in environmental and resource and economics [J] . American Journal of Agricultural Economics , 2001, 83 (3) : 705 — 710 .
- [6] Maddison D . Modelling sulphur emissions in Europe : A spatial econometric approach [J] . oxford Economic Paper , 2007 . 59 (4) : 726 — 743 .
- [7] 陈刚. FDI 竞争、环境规制与污染避难所——对中国式分权的反思 [J] . 世界经济研究, 2009 (6) : 82 — 92 .
- [8] 徐伟,陈光辉,曾玉,等.关系研究的新取向:社会网络分析 [J]. 心理科学, 2011 (2) : 4 钧— 504 .
- [9] 李荔,毕军,杨金田,等.我国二氧化硫排放强度地区差异分解分析[J] . 中国人口·资源与环境, 2010 (51) : 34 — 38 .
- [10] 杨桂元,吴齐,涂洋.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[J]. 商业经济与管

理, 2016 (4) : 56 -68 , 78 .

[11] 刘华军, 刘传明, 杨骞. 环境污染的空间溢出及其来源——基于网络分析视角的实证研究 [J] . 经济学家, 2015 (10) : 28 • 35 .

[12] 高兴亮, 殷为华. 基于引力模型的山东省城市经济联系格局演变 [J] . 中国人口. 资源与环境. 2015 (51) : 458 — 461 .

[13] 赵雪雁, 江进德, 张丽, 等. 皖江城市带城市经济联系与中心城市辐射范田分析 [J] . 经济地理, 2011 (2) : 218 — 223 .

[14] 李山, 王铮, 钟章奇. 旅游空间相互作用的引力模型及其应用[J] . 地理学报, 2012 (4) : 526 - 544.

[15] 史朝兴, 顾海英. 贸易引力模型研究新进展及其在中国的应用 [J]. 财贸研究, 2005 (3) : 27 — 32 .

[16] 马伟, 王亚华, 刘生龙. 交通基础设施与中国人口迁移: 基于引力模型分析 [J]. 中国软科学, 2012 (3) : 69 — 77 . 1171

[17] 江阿, 卢现祥. 环境规制变量的度量方法研究 [J] . 统计与决策. 2011 (22) : 19 • 22 .

[18] 刘军. 整体网络分析 — UCINET 软件实用指南[M]. 第 2 版. 上海: 格致出版社, 2014 .