

# 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<sup>\*</sup>

施智敏<sup>1)</sup> 刘忠林<sup>2)</sup> 郝岩<sup>1)</sup> 刘晓宇<sup>1)</sup> 张力小<sup>1)†</sup>

(1)北京师范大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 100875, 北京;

2)临沂生态环境监测中心, 276000, 山东临沂)

**摘要** 以吉林省为例, 基于环境扩展投入产出与生态网络分析方法, 建立了吉林省 2002、2017 年区域碳代谢系统网络模型, 探究东北老工业基地振兴计划实施下产业部门间的碳排放流动过程, 解析碳排放的产业部门关联机制。结果表明: 1) 研究期间, 吉林省的碳排放量大幅增长, 从 2002 年的  $2.54 \times 10^4$  万 t 增加到 2017 年的  $4.36 \times 10^4$  万 t, 其中间接碳排放是吉林省碳排放的主要方式。2) 与能源和资源供给相关的部门是系统中重要的控制部门, 优势制造业及服务业部门是系统中主要的汇集部门。随着东北振兴对技术密集型产业发展的需求, 技术密集型产业在系统中的作用越来越重要。3) 系统以限制/掠夺关系为主导, 研究期间竞争关系数量下降 9.25%, 共生关系数量上升 6.61%。4) 系统冗余度增加, 效率降低, 稳健性指数从 0.32 下降到 0.31, 表明系统处于不可持续发展状态。

**关键词** 碳中和; 生态网络分析; 环境扩展投入产出分析; 东北老工业基地; 吉林省

**中图分类号** X24

**DOI:** 10.12202/j.0476-0301.2021096

## 0 引言

气候变化被认为是 21 世纪人类面临的最复杂挑战之一<sup>[1]</sup>。作为负责任的发展中国家, 中国政府在第七十五届联合国大会上提出: “中国将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, 二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和。”<sup>[2]</sup> 碳达峰与碳中和目标的提出, 必然促进区域产业结构的重构与系统性节能减排。作为中国的重工业聚集区, 东北老工业基地长期依赖于高投入、高消耗和高污染的粗放型发展模式, 已成为中国碳排放的高值区<sup>[3]</sup>。自 2003 年国家实施东北老工业基地振兴计划以来, 东北地区经济取得了较快的发展。在这种背景下, 系统分析老工业基地振兴计划实施下东北地区碳排放的变化趋势, 解析产业部门间的碳排放关联机制, 对于寻求系统性的减排路径, 促进区域经济低碳可持续发展, 实现碳中和承诺愿景具有重要的现实意义。

从国民经济大系统的角度出发开展节能减排工作, 已成为学界的共识<sup>[4]</sup>。因此对产业部门碳排放的研究不应孤立地分析单个部门的直接碳排放情况, 而应当考虑中间投入要素中隐含碳排放带来的产业部

门间技术和经济联系, 以揭示其代谢机制和运行规律, 从而达到整体减排的效果。区域碳代谢的概念来源于城市代谢理论。随着气候变化越来越受到全球关注, 区域碳代谢过程的研究受到学者们的广泛关注。已有一系列研究在全球<sup>[5]</sup>、国家<sup>[6-7]</sup>以及区域<sup>[8-9]</sup>尺度上核算碳代谢过程、分析碳代谢网络、探究碳代谢过程的空间格局<sup>[10]</sup>。这些研究指出, 区域碳代谢的研究可以具体揭示系统的内在结构和功能, 从而探究区域发展过程中资源短缺和过度碳排放的问题, 并描绘社会-经济系统内碳排放过程及其与产业结构错综复杂的联系<sup>[11]</sup>。因此, 区域碳代谢系统的结构和功能分析成为一个重要的研究课题。

目前, 环境扩展投入产出分析(EEIOA)法与生态网络分析(ENA)法是研究区域碳代谢的重要方法。EEIOA 法是一种建立在环境要素(如能源、二氧化碳等)和经济投入产出理论上的分析方法<sup>[12]</sup>。它可以分析系统内产业部门之间的直接和间接碳排放关联, 并通过从产业部门之间相互作用和交换衍生出的隐含碳排放强度, 追踪相应产业部门碳排放的流动路径和代谢过程<sup>[13-14]</sup>。Shao 等<sup>[15]</sup>采用投入产出模型, 测算了 2007 和 2010 年中国 30 个地区的隐含碳排放, 以此探

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(52070022, 72161147003)

<sup>†</sup> 通信作者: 张力小(1977—), 博士, 教授, 博导。研究方向: 城市生态系统分析与协同管理。E-mail: zhanglixiao@bnu.edu.cn

收稿日期: 2021-04-19

究中国区域间的碳排放失衡情况. Feng 等<sup>[16]</sup>追踪了中国省际和国际贸易产品中的二氧化碳代谢过程,发现了区域间碳排放相互作用机制. 这些研究结果表明, EEIOA 方法能够揭示区域碳代谢机制, 量化各部门最终负责的碳排放量, 并提供有关区域经济结构的重要信息. 然而, EEIOA 虽然为探索区域碳代谢机制提供了有效的方法支持, 但未能详细阐述内部网络的特征, 如网络结构、组成部分的作用、城市系统内能量流动的交换过程等<sup>[17]</sup>. 将 EEIOA 法与 ENA 法相结合, 则可以克服这些缺点<sup>[18]</sup>. ENA 方法可以揭示系统的内部功能结构和各部门之间的相互关系. 它通过将不同部门之间、系统与环境之间的直接和间接关系具体化, 描述系统的整体特征<sup>[19]</sup>. Fang 等<sup>[20]</sup>通过 ENA 方法将碳排放强度、区域社会经济状况与隐含碳网络结构相结合, 评价区域碳排放网络的鲁棒性特征. Wang 等<sup>[21]</sup>以重庆市为例, 揭示产业部门之间的生态关系, 识别隐含碳排放网络中具有推拉效应的关键部门. 总体来说, EEIOA 能够将经济要素与碳排放联系起来, ENA 则可沿着供应链追踪碳排放流动, 揭示部门关系和系统结构<sup>[17]</sup>. 因此, EEIOA-ENA 框架下的区域碳代谢研究, 有助于更全面、更完整地理解碳代谢系统的过程和机制. 在此框架下, 李吉喆<sup>[4]</sup>研究了 2000—2015 年广东省碳代谢系统的系统结构与功能关系. Chen 等<sup>[22]</sup>以东莞市为例, 揭示社会经济系统中碳排放的关键贡献者和影响因素.

目前, 针对碳中和背景下老工业基地省份的碳代谢系统研究仍然较少. 受到振兴东北老工业基地政策的影响, 东北地区各省份的产业发展具有很强的政策导向性. 吉林省作为东北地区的重要组成省份, 其制造业发达, 产业部门之间关系复杂. 在近 20 年的振兴过程中, 吉林省的经济社会发展并不理想, 环境与发展之间的矛盾仍然突出. 有效的管理政策应当针对管理对象的特点因地制宜地提出. 因此, 本文以吉林省为例, 通过 EEIOA-ENA 框架, 建立了吉林省 2002 与 2017 年基于排放的碳代谢网络模型, 分析吉林省碳代谢过程, 核算产业部门碳排放量, 识别部门间的控制依赖程度与生态关系, 评估系统的整体可持续性, 以期为吉林省以及东北老工业基地制定减排战略, 实现碳中和提供定量化的分析依据.

## 1 研究方法

**1.1 数据来源** 以吉林省碳代谢系统为研究对象, 通过构建吉林省区域碳代谢生态网络模型, 以量化 2002—2017 年社会经济系统中各部门之间的相互作用和流动路径. 所需的数据包括能源消费量、碳排放

系数和经济部门投入产出表 3 大类. 其中能源消费量数据来自于《吉林统计年鉴》<sup>[23]</sup>, 碳排放系数来自于《国家温室气体清单指南》<sup>[24]</sup>, 各年份投入产出表来自于国家统计局<sup>[25]</sup>. 为了使结果保持一致和具有可比性, 所有的数据表都被聚合为 28 个经济部门, 具体分类见表 1.

表 1 吉林省 28 个经济部门

部门分类	部门序号	部门名称
农业	1	农林牧渔部门
矿业	2	煤炭开采和洗选部门
	3	石油和天然气开采部门
	4	金属矿采选部门
	5	非金属矿及其他矿采选部门
	6	食品制造及烟草加工部门
制造业	7	纺织部门
	8	纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品部门
	9	木材加工及家具制造部门
	10	造纸印刷及文教体育用品制造部门
	11	石油加工、炼焦及核燃料加工部门
	12	化学产品制造部门
	13	非金属矿物制品部门
	14	金属冶炼及压延加工部门
	15	金属制品部门
	16	通用专用设备制造部门
	17	交通运输设备部门
	18	电气机械和器材部门
	19	通信设备、计算机及其他电子设备制造部门
	20	仪器仪表及文化办公用机械制造部门
	21	其他制造产品和废品废料部门
电力、热力、燃气及水的生产供应业	22	电力热力的生产和供应部门
	23	燃气生产和供应部门
	24	水的生产和供应部门
建筑业	25	建筑部门
服务业	26	交通运输及仓储邮政部门
	27	批发零售及餐饮住宿部门
	28	其他服务部门

**1.2 投入产出分析模型** 首先, 构建吉林省环境扩展投入产出模型表, 以矩阵的形式阐述经济部门之间的碳排放流动信息. 环境扩展投入产出表是构建碳代谢生态网络模型的基础, 可使用货币投入产出表和隐含碳排放系数计算得到<sup>[26-28]</sup>:

$$E + \epsilon H = \epsilon U, \quad (1)$$

$$\epsilon = E[U - H]^{-1}, \quad (2)$$

式中:  $\epsilon$ 是隐含碳排放系数,  $\epsilon = [\epsilon_i]_{1 \times n}$ 代表第  $i$  个部门生产 1 单位货币产品所产生的碳排放量;  $E$  为流出各部门的初始碳排放体量;  $U = [u_{ij}]_{n \times n}$ , 且当  $j=i$  时,  $u_{ij}$  等于部门  $i$  的经济产出, 当  $j \neq i$  时,  $u_{ij}$  等于 0;  $H = [h_{ij}]_{n \times n}$  为经济价值流矩阵, 其中  $h_{ij}$  表示  $i$  部门对  $j$  部门的经济投入。

基于此, 生态网络流量矩阵  $F = [f_{ij}]_{n \times n}$ , 计算式为

$$F = [f_{ij}]_{n \times n} = \epsilon H, \quad (3)$$

式中  $f_{ij}$  表示由部门  $i$  与部门  $j$  的交流而引起的温室气体排放。

**1.3 生态网络分析指标** 生态网络分析方法可以模拟系统内部的能量物质流动, 识别部门之间的功能关系, 并评估系统的整体性能<sup>[29]</sup>。流量分析是生态网络分析的基础。根据质量守恒理论, 流出  $i$  部门的总流量等于进入  $i$  部门的总流量, 即

$$T_i = T_i^{\text{in}} = \sum_{j=1}^n f_{ij} + z_i = T_i^{\text{out}} = \sum_{j=1}^n f_{ij} + y_i, \quad (4)$$

式中:  $T_i$  表示各部门的总流量, 定义为流入或流出  $i$  部门的部门间碳排放量和边界碳排放量的总和;  $f_{ij}$  为节点  $i$  到  $j$  的流;  $y_i$  表示部门的边界流出(向外部输出);  $z_i$  表示部门  $i$  的边界流入(外部输入)。基于此, 直接碳排放表示一个部门排放至外部环境中的二氧化碳, 而间接碳排放量则是通过中间产品和服务排放的二氧化碳。各部门的间接排放量计算式<sup>[30]</sup>为

$$E_i = [ie]_{n \times n} = \sum_{i=1}^n f_{ij}, \quad (5)$$

控制分析可以用来量化部门之间的控制关系<sup>[31]</sup>。通过系统积分流定义控制矩阵, 从而运用控制矩阵来反映系统整体结构中一个部门对另一个部门的影响<sup>[32]</sup>。积分流的计算方法为

$$N = (n_{ij}) = G^0 + G^1 + G^2 + \dots + G^n = (I - G)^{-1},$$

$$G = [g_{ij}] = f_{ij}/T_j, \quad (6)$$

$$N' = (n'_{ij}) = G'^0 + G'^1 + G'^2 + \dots + G'^m = (I - G')^{-1},$$

$$G' = [g'_{ij}] = f_{ij}/T_i, \quad (7)$$

式中:  $N = (n_{ij})$  为面向输出的量纲一积分流矩阵;  $N' = (n'_{ij})$  为面向输入的量纲一积分流矩阵;  $G = [g_{ij}]$ ,  $G' = [g'_{ij}]$ , 分别为部门面向输出和输入的直接量纲一矩阵; 自反馈矩阵  $G^0$ 、 $G'^0$  反映了每个节点的自反馈效果;  $G^1$ 、 $G'^1$  表示节点之间流动路径长度为 1,  $G^n$ 、 $G'^n$  表示节点之间的路径长度为  $n$ ;  $I$  为单位矩阵。基于此, 可计算控制差分矩阵 ( $C_d$ ) 和量纲一控制比矩阵 ( $C_r$ ), 并以此比较直接和间接影响下两部门之间的碳排放量流动情况。

$$C_d = [c_{dij}] = [n_{ij} - n_{ji}], \quad (8)$$

$$C_r = [c_{rij}] = \begin{cases} n_{ij} - n_{ji} > 0, c_{rij} = \frac{n_{ij} - n_{ji}}{n_{ij}}, \\ n_{ij} - n_{ji} \leq 0, c_{rij} = 0, \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $c_{dij}$  和  $c_{rij}$  表示  $j$  部门通过积分流对  $i$  部门的净控制影响,  $c_{dij}$  为正, 表示控制强度, 为负则表示依赖强度;  $c_{rij}$  的值为 0~1, 当其接近于 1 时, 两部门之间的控制关系具有明确的方向性, 当其接近于 0 时, 两部门之间的控制关系不明显且方向不确定。

效用分析可有效揭示网络中不同部门之间的生态关系<sup>[33]</sup>。通过直接效用矩阵  $D$ , 量纲一积分效用矩阵  $U$  可由下式得出:

$$D = [d_{ij}] = \frac{(f_{ij} - f_{ji})}{T_i}, \quad (10)$$

$$U = (U_{ij}) = D^0 + D^1 + D^2 + D^3 + \dots + D^m = (I - D)^{-1}, \quad (11)$$

式中:  $D = [d_{ij}]$  为代谢系统的直接效用矩阵;  $U = (U_{ij})$  为覆盖所有路径的积分效用矩阵;  $U$  矩阵中元素的符号 ( $\text{sgn}(U)$ ) 可以定义部门之间的相互关系, 部门之间的综合效用关系可定义为 4 种类型: (+, +) 表示共生关系; (-, +) 表示限制关系; (+, -) 表示掠夺关系; (-, -) 表示竞争关系。

效率和冗余之间的平衡, 对于实现网络平衡具有重要意义。系统的鲁棒性 ( $S_R$ ) 指标可以在单一的度量中衡量系统效率与冗余之间的平衡, 从而评估系统的可持续性<sup>[34]</sup>。  $S_R$  可通过网络的上升性指标 ( $A$ ) 和发展能力指标 ( $C$ ) 计算:

$$S_R = -\alpha \ln \alpha, \quad (12)$$

$$\alpha = A/C, \quad (13)$$

$$A = T_{ST}^2 \sum_{ij} \frac{f_{ij}}{T_{ST}} \ln \frac{f_{ij} T_{ST}}{T_i T_j}, \quad (14)$$

$$C = -T_{ST}^2 \sum_{ij} \frac{f_{ij}}{T_{ST}} \ln \frac{f_{ij}}{T_{ST}}, \quad (15)$$

式中:  $T_{ST}$  为整个代谢网络的系统总输入量或输出量, 即  $T_{ST} = \sum_{i=1}^n T_i$ ;  $A$  表示系统的组织和效率, 显示部门间流动导致的网络演化和顺序<sup>[35]</sup>;  $C$  反映根据网络的规模和自组织流模式定义网络所包含的信息量<sup>[36]</sup>。

## 2 结果分析

**2.1 碳排放核算** 如图 1 所示, 2002—2017 年, 吉林

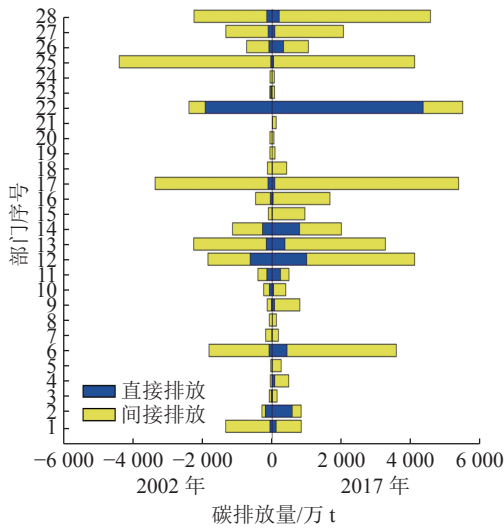


图 1 吉林省 2002、2017 年各部门碳排放情况

省碳排放量快速增长;碳排放总量从 2002 年的  $2.54 \times 10^4$  万 t 增加到 2017 年的  $4.36 \times 10^4$  万 t, 其中直接碳排放的比例从 16.91% 增加到 20.40%; 电力、热力的生产供应部门(22)的碳排放增长幅度最大, 共增长了 3096.24 万 t; 其次是其他服务部门(28), 增长了 2307.4 万 t; 优势制造业部门的碳排放量也呈现出了显著增长, 如化学产品制造部门(12)和交通运输设备部门(17)的碳排放量分别增加了 2253.53 万 t 和 2000.25 万 t. 自振兴东北老工业基地战略实施以来, 立足于现有优势产业, 做大做强加工制造业, 积极发展服务业一直是吉林省发展的重要内容<sup>[37]</sup>. 在一系列政策的实施下, 化学产品制造业与交通运输设备业的行业规模迅速扩大, 碳排放量也随之增加. 在增长速率方面, 由于工业连锁效应, 金属矿采选与非金属矿及其他矿采选部门也得到了快速发展, 碳排放量分别增长了 9.26 和 6.12 倍. 需要注意的是, 建筑部门(25)最初的碳排放量最高, 但该部门的排放量在 2017 年下降了 6.7%. 主要是吉林省在 2002—2011 年处于快速城镇化阶段, 城镇化率从 44.5% 增加到 48%, 城市建设与更新刺激了建筑业的发展, 在这期间, 房屋建筑施工面积增加了 4971 万  $m^2$ . 2011 年以来, 城镇化率增长放缓(仅从 48% 增加到 49.6%)及大型基础配套设施的完善, 使得建筑业发展式微, 建筑施工面积仅增加了 1889 万  $m^2$ , 不足前者的 40%<sup>[23]</sup>. 研究期间, 纺织部门(7)的碳排放量呈现下降趋势, 纺织行业的规模缩小是造成这一趋势的原因之一. 2002—2017 年吉林省纺织业主要产品产量明显下降, 其中化学纤维产量下降 15.97 万 t, 布产量下降 7 672 万 m, 纱产量下降 2.03 万 t<sup>[23]</sup>. 与此同时, 严格的环保要求也带动了纺织行业生产设备与生产技术的升级, 从而实现了该

部门的节能减碳<sup>[38]</sup>. 不同部门的直接与间接碳排放之间存在着很大差异, 且在这期间经历了较大的变化. 在所有部门中, 电力热力的生产供应部门的直接排放量最大, 该部门直接碳排放量在 2002 和 2017 年分别为 1930.21 万 t 和 4350.37 万 t. 与此同时, 电力热力的生产供应部门直接碳排放量的增幅最大. 作为基本能源供应部门, 吉林省的居民生活和社会经济发展均离不开该部门的生产活动, 但其高耗能、重煤炭的特点, 导致其在研究期间的直接碳排放量始终居高不下, 并呈现出显著增长. 对于间接排放而言, 2002 年建筑部门的间接碳排放量最高, 为 4360.59 万 t, 而 2017 年间接碳排放量最高的部门是交通运输设备部门, 为 5292.88 万 t. 这一转变与振兴战略下的产业结构调整密切相关.

在研究期间, 间接排放一直是吉林省大多数部门碳排放的主要方式. 直接碳排放量较高的部门通常与资源开采和生产有关, 如煤炭开采和洗选部门(2)、电力热力的生产供应部门的直接碳排放量均占到了总排放量的 60% 以上; 而间接碳排放量较高的部门主要分布在产业供应链的末端, 如建筑部门、电气机械和器材部门(18)及通信设备、计算机及其他电子设备部门(19)的间接碳排放量则占到了总排放量的 98% 以上. 这些部门通过中间产品的利用, 碳排放量已经外包给了供应链上的上游部门. 因此, 提高这些部门中间产品的转移效率和消费效率, 对于整个产业经济的系统性减排至关重要.

**2.2 碳代谢网络控制分析** 部门间的控制和依赖关系有助于识别研究期间碳代谢系统的关键部门, 了解碳排放的驱动因素. 控制差异矩阵( $C_d$ )可在考虑直接和间接影响的同时, 观察部门间一对一的控制和汇集关系<sup>[39]</sup>. 如图 2-a、b 所示, 矩阵中的正值代表控制强度, 负值表示汇集强度. 在 2002 年, 许多部门之间存在着一些显著的控制关系. 如: 非金属矿及其他矿采选产品部门(5)对建筑部门有着强烈的控制作用( $c_{d25, 5} = 5.33$ ), 表明非金属矿及其他矿采选产品的生产活动对建筑部门的碳排放具有很大的影响; 建筑部门对非金属矿物制品部门(13)的汇集性较强( $c_{d25, 13} = -1.26$ ), 说明建筑业部门的碳排放汇集了非金属矿物制品部门的生产活动. 可以看出, 2002 年, 大量的隐含碳排放从煤炭采选产品部门、非金属矿及其他矿采选产品部门、金属制品部门(15)、电力热力的生产供应部门流向食品制造及烟草加工部门(6)、交通运输设备部门、建筑部门以及其他服务部门. 2017 年, 重要的流动路径则存在于电子和通信设备部门(19)、

仪器仪表制造部门(20)以及其他制造产品和废品废料部门(21)与食品制造及烟草加工部门、非金属矿物制品部门、金属冶炼与延压加工品部门(14)、交通

运输设备部门、电力热力的生产供应部门、建筑业部门以及其他服务业部门之间。由此可见, 振兴战略的实施一定程度上推动了吉林省产业发展的技术革新。

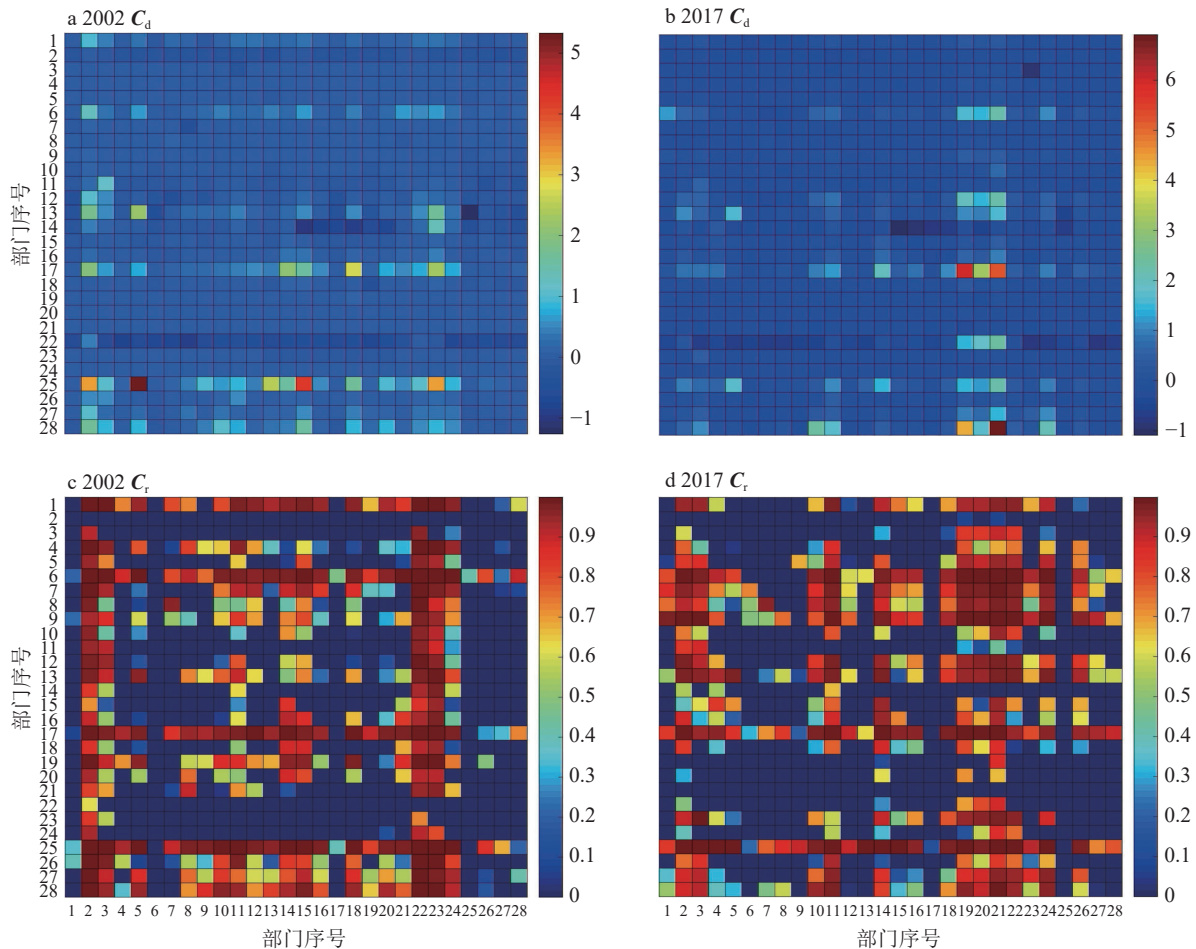


图2 2002、2017年吉林省碳代谢系统控制差异矩阵( $C_d$ )与量纲一控制比矩阵( $C_r$ )

量纲一控制比矩阵( $C_r$ )可以进一步反映控制关系方向性及强弱。分析结果显示, 研究期间部门之间的交互更加密切, 两两部门之间具有方向性更加明确的控制关系。所有部门中, 与能源和资源供给相关的部门是系统中的主导控制部门, 如煤炭采选产品部门、石油炼焦产品及核燃料加工产品部门、电力热力的生产供应部门, 这些部门作为产业链的上游部门, 其生产活动强烈影响着其他部门的碳排放。以食品制造及烟草加工部门、交通运输设备部门为代表的优势制造业和服务业是系统中的主要汇集部门, 其碳排放受到系统中其他许多部门的控制。因此, 提高主要汇集部门的资源利用效率和相关产品的回收利用率, 并为工业生产及居民生活提供更加清洁低碳的能源, 对系统的减排十分必要。此外, 农业部门的碳排放被系统中的大多数部门所控制, 这可能是由于吉林省农业机械化水平较高所致。

**2.3 碳代谢网络效用分析** 部门间的效用分析可以

进一步揭示部门间的生态关系(图3)。整体上来说, 吉林省碳代谢系统中共有378对生态关系。限制和掠夺关系的方向不同, 但实质上是同一种相互关系。2002和2017年, 限制/掠夺关系占主导地位, 并保持相对稳定, 仅从49.21%小幅上升至51.85%; 竞争关系是系统中的第二大主导关系, 但其占比呈下降趋势, 由41.53%下降到32.28%; 共生关系在整个研究期间均低于20%(由8.62%增加到15.87%)。这些结果表明, 各部门之间的限制/掠夺关系始终处于主导地位, 碳代谢系统的共生关系水平仍有待提高。

限制/掠夺关系类似于生态系统中的被捕食者-捕食者关系, 可以反映供应链上不同部门之间上下游联系。在研究期间, 交通运输及仓储邮政部门(26)的限制关系数量呈现出了显著的增长, 这说明该部门更有可能被系统中的其他部门所利用。推进形成物流中心和交通枢纽, 正是吉林省振兴政策的重点之一<sup>[40]</sup>。在该政策的作用下, 交通运输及仓储邮政部门成为支

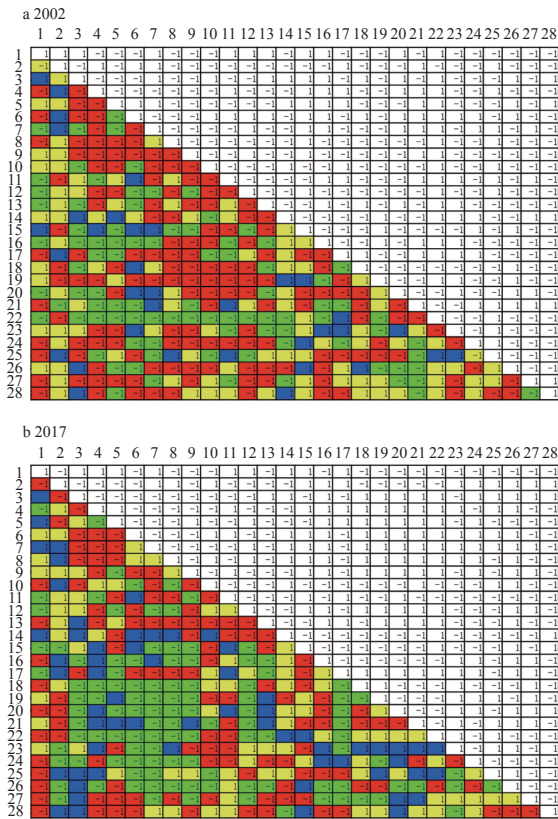


图 3 2002、2017 年吉林省碳代谢系统部门间生态关系

持其他产业部门生产运行的重要部门。作为系统中其他部门的“捕食对象”，交通运输及仓储邮政部门在与其他部门交流的过程中，通过传递中间使用产品将隐含的二氧化碳输送到其他部门，从而导致了其他部门的碳排放增加。与此相反，化学产品制造部门(12)和交通运输设备部门(17)中的掠夺关系增加明显，表明这些支柱产业在生产过程中使用了大量来自其他部门的产品/服务，体现出更加强劲的发展态势。其中，化学产品制造部门和交通运输设备部门与技术密集型产业(19, 20)的关系均从竞争关系转变为掠夺关系，意味着吉林省 2 大重要支柱行业的发展更加依赖于技术密集型产业。振兴战略中“立足于现有支柱产业、优势产业基础，实现产业创新和科技创新”<sup>[42]</sup>的思路，使得吉林省的发展更加依托科技产业和人才资源，区域创新能力的增强及传统工业的提升，导致了支柱产业与技术密集型行业生态关系的转变。研究期间，竞争关系广泛存在于服务业部门(26~28)中，具体存在于服务业与大多数制造业部门之间，以及服务业内部部门之间。例如，其他服务部门(28)与化学产品制造部门之间一直存在竞争关系，表明化学产品制造部门的碳排放对其他服务部门造成了压力。在研究期间，这 2 个部门均收到了来自电力热力的生产供应部门(22)传递的隐含碳排放，捕食对象的重叠导致了 2 个部门间持续的竞争关系。此外，其他服务业部

门与交通运输及仓储邮政部门(26)以及批发零售及餐饮住宿部门(27)之间也一直存在竞争关系。在这种背景下，制造业部门快速发展，服务业部门内部相互限制，这给吉林省产业结构和消费结构升级带来了困难<sup>[41]</sup>。值得注意的是，2017 年，其他制造产品和废品废料部门(21)超过了金属制品部门(15)，成为碳代谢系统中共生关系最多的部门。这表明其他制造产品和废品废料部门处理的材料和能源可以对其他部门进行补充，而其他部门的废物可以被回收部门消费和分解。在这种情况下，提高吉林省废品废料部门的规模和效率可以实现区域多部门共同减排，是构建碳代谢共生体系的重要途径。

**2.4 碳代谢系统鲁棒性分析** 碳代谢系统鲁棒性可反映系统的可持续发展性能。当  $S_R$  值接近曲线最高点时，系统既具有较高的效率，又具有较高的稳定性。若  $\alpha$  大于最优平衡点，表明系统的效率较高，但系统脆弱；相反，则表明系统的冗余度较高，但效率低下<sup>[42]</sup>。如图 4 所示， $S_R$  指标的值在 2002 和 2017 年都位于最优平衡点的左边，表明系统中部门之间稳定的循环和交互作用限制了高效率的碳交换。此外，系统的  $S_R$  值从 2002 年的 0.32 下降到了 2017 年的 0.31，反映了系统正在向高冗余、低效率的不可持续状态发展。隐藏在产品和服务中的二氧化碳通过供应链在不同部门之间多路径流动，导致系统效率较低。因此，需要适度提高系统的效率，减少碳代谢流动的路径选择，从而提高系统的可持续发展性能。

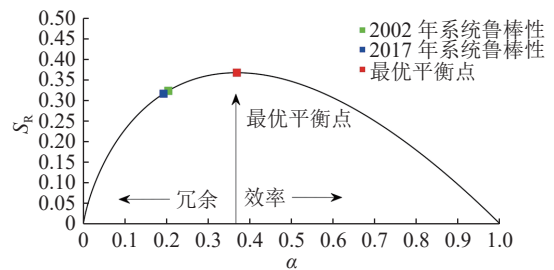


图 4 吉林省碳代谢网络系统的鲁棒性

### 3 讨论

在振兴战略的推动下，吉林省碳排放量显著增长，面临的减排压力更加巨大。本文研究了振兴政策背景下，吉林省碳代谢的网络关系作用机制，相关结果可为吉林省产业转型、节能减排等政策的制定提供以下建议：

1) 考虑减排、减碳过程的传递性。结合研究结果与振兴东北老工业基地的战略计划，可以发现吉林省碳排放量大幅增长，显著增长部门主要集中在振兴战略重点发展部门，如交通运输设备部门、化学产品制

造部门。因此,需要政府在贯彻落实产业发展与经济振兴的同时,严格做好节能减排管理。长期以来,吉林省的减排、减碳工作都聚焦于重点排放行业的监督与整治。靶向性的减排政策虽然逐渐限制了高排放行业的粗放型发展,但因行业规模的扩大以及技术壁垒的存在,在区域整体系统性减排上仍然缺乏力度。碳排在供应链上具有传递性,末端部门通过中间产品及服务,将大量的碳排放外包给了供应链上的上游部门,使得末端部门产生的直接碳排放量看似较低,但其生产活动过程导致的隐含碳排放量却不容忽视。因此,需要从整个产业经济系统的角度分析减排潜力,制定减排政策,实现系统性碳排放大幅下降。对吉林省而言,应大力推动绿色供应链体系的构建,倡导绿色制造,推行制造产品全生命周期绿色管理,着力针对汽车制造、设备制造、建筑等重点行业实施绿色低碳供应链的试点管理。鼓励使用和采购低碳甚至零碳产品及服务,优化供应链的每个环节,实现供应链上的各产业系统性减排。

2) 针对各部门特点实施差异化减排措施。在实现碳中和愿景和巨大的减排压力之下,为促进各产业部门节能减排工作的有效开展,根据各部门在整个碳代谢系统中的作用和贡献,部门差异化减排管理应当纳入吉林省当前及未来节能减排工作的考量中。分析结果显示:与能源和资源提供相关的部门直接排放高,是系统中的主要控制部门;间接排放量高的部门以及主要汇集部门,则多位于产业链的末端。因此,对于直接排放量较高的部门,应采取措施加强末端处理,如清洁生产、能源利用结构调整、技术更新以及强制淘汰效率低下的生产设施;而对于制造业与服务业等间接排放量较高的末端产业,干预措施应集中于减少浪费,特别是减少不必要的中间产品的使用,增加其生产过程中对资源的重复利用与回收。

3) 将循环经济理论应用于振兴政策中城市碳排放现行管理。现行政策侧重于碳排放总量控制和能源利用结构优化,而忽视了碳排放系统中存在的生态压力,以及碳循环的效率与冗余的平衡。如本文所述,吉林省经济发展仍处于能源密集型阶段,产业互动以限制/掠夺关系为主,共生关系很低。且2002与2017年吉林省的碳代谢系统均处于低效率高冗余的不可持续状态。低共生关系和过度冗余的系统不利于整个产业部门的共同减排。我们的研究表明,其他制造业和废品废料部门是系统中重要的共生部门,而系统效率的提高则需要减少碳代谢流动的路径选择,针对性地促进末端产业简化生产路径。因此,吉林省应大力发展循环经济,缩小资源流动路径,实现

资源在部门内部和部门间小范围的循环,以精简冗余的资源流动路径,实现碳代谢流动的路径简化,如强化生态工业园区产业共生模式的发展。

## 4 结论

本文系统分析了东北振兴战略实施以来,吉林省碳代谢网络的变化情况,利用EEIOA和ENA方法核算区域及部门碳排放量、识别影响碳代谢的关键部门和路径、揭示复杂生态关系、分析系统整体可持续性,对于探究区域碳排放的产业部门关联机制及制定有效的减排政策具有重要意义。主要结论与政策启示如下:

1) 2002—2017年,吉林省碳排放量大幅增长,间接排放一直是吉林省大多数部门碳排放的主要方式,直接碳排放量较高的部门通常与资源、能源的供给有关,间接碳排放量较高的部门主要分布在产业链的末端。对系统中的关键节点而言,与能源和资源供给相关的部门是系统中重要的控制部门,优势制造业及服务业部门是系统中主要的汇集部门。随着振兴政策的实施,吉林省的产业结构和碳代谢格局都发生了显著变化,2017年电子和通信设备部门等技术密集型部门成为碳代谢系统中重要的控制部门。碳代谢系统中,各部门之间的限制/掠夺关系一直占主导地位,竞争关系数量有所下降,共生关系数量小幅上升。其中,支柱产业的掠夺关系明显提升,服务业竞争关系持续存在,其他制造业与废品废料部门的共生关系增加显著。对于系统整体而言,过高的冗余及较低的效率导致系统鲁棒性的下降,不利于碳代谢系统的可持续发展与减排目标的达成。

2) 吉林省的产业发展与振兴政策高度相关,在振兴政策的推动下产业部门碳排放量大量增加。间接排放为主的排放模式,复杂的部门关系和碳流路径构成了吉林省低效率高冗余的碳代谢系统。因此,实现吉林省碳中和承诺目标,全面振兴吉林老工业基地,需要改善高污染、高排放的发展模式。显然,实现相关目标,需要根据振兴政策下产业部门的发展方向,结合当前产业部门的排放特点,考虑部门之间复杂的相互关系以及碳排放的传递性,不断推进区域系统性减排。

3) 需要说明的是,碳排放与能源结构密切相关,但本文重点分析吉林省碳代谢情况,未考虑各部门能源利用结构对碳排放的影响。在未来的研究中,会重点分析能源结构变化与碳代谢之间的关系。同时,黑龙江和辽宁2省的碳代谢研究对东北地区减排与振兴同样具有重要启示,在后续研究中,将以当前研究模型为基础,构建更大尺度的系统集成模型,用于整个东北地区的碳代谢研究。

## 5 参考文献

- [1] 庄贵阳. 气候变化挑战与中国经济低碳发展[J]. 国际经济评论, 2007(5): 50
- [2] 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话[EB/OL]. (2020-09-22) [2021-04-10]. [http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content\\_5546168.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546168.htm)
- [3] 李绍萍, 王倩, 刘洋. 基于LMDI的东北老工业基地工业碳排放影响因素实证分析[J]. 中国石油大学学报(社会科学版), 2013, 29(4): 18
- [4] 李吉喆. 基于投入产出模型的城市碳排放代谢分析: 以广东省为例[D]. 北京: 华北电力大学, 2019
- [5] HUANG L Z, KRIGSVOLL G, JOHANSEN F, et al. Carbon emission of global construction sector[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 1906
- [6] LIANG S, QU S, XU M. Betweenness-based method to identify critical transmission sectors for supply chain environmental pressure mitigation[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(3): 1330
- [7] WANG Z H, LIU W, YIN J H. Driving forces of indirect carbon emissions from household consumption in China: an input-output decomposition analysis[J]. Natural Hazards, 2015, 75(2): 257
- [8] XIE Z Q, GAO X N, YUAN W H, et al. Decomposition and prediction of direct residential carbon emission indicators in Guangdong Province of China[J]. Ecological Indicators, 2020, 115: 106344
- [9] ZHAI M Y, HUANG G H, LIU L R, et al. Inter-regional carbon flows embodied in electricity transmission: network simulation for energy-carbon nexus[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 118: 109511
- [10] 夏琳琳, 张妍, 李名镜. 城市碳代谢过程研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(12): 4268
- [11] LIANG S, WANG C, ZHANG T Z. An improved input-output model for energy analysis: a case study of Suzhou[J]. Ecological Economics, 2010, 69(9): 1805
- [12] JIANG W Q, LI J S, CHEN G Q, et al. Mercury emissions embodied in Beijing economy[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 129: 134
- [13] CHEN B, LI J S, WU X F, et al. 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
- [14] ZHANG Y, YANG Z F, FATH B D, et al. Ecological network analysis of an urban energy metabolic system: model development, and a case study of four Chinese cities[J]. Ecological Modelling, 2010, 221(16): 1865
- [15] SHAO L, LI Y, FENG K S, et al. Carbon emission imbalances and the structural paths of Chinese regions[J]. Applied Energy, 2018, 215: 396
- [16] FENG K S, DAVIS S J, SUN L X, et al. Outsourcing CO<sub>2</sub> within China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(28): 11654
- [17] TANG M H, HONG J K, GUO S, et al. A bibliometric review of urban energy metabolism: evolutionary trends and the application of network analytical methods[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 279: 123403
- [18] ZHAO X, LIU J G, YANG H, et al. Burden shifting of water quantity and quality stress from megacity Shanghai[J]. Water Resources Research, 2016, 52(9): 6916
- [19] HANNON B. The structure of ecosystems[J]. Journal of Theoretical Biology, 1973, 41(3): 535
- [20] FANG D L, CHEN B. Information-based ecological network analysis for carbon emissions[J]. Applied Energy, 2019, 238: 45
- [21] WANG Z, WANG X, SHA P, et al. Interactions between households and industrial sectors in embodied carbon emission networks[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 275: 123809
- [22] CHEN Q H, SU M R, MENG F X, et al. Analysis of urban carbon metabolism characteristics based on provincial input-output tables[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 265: 110561
- [23] 吉林省统计局. 吉林统计年鉴[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2003
- [24] IPCC2006. 2006年IPCC国家温室气体清单指南[R/OL]. 神奈川: 全球环境战略研究所, 2006 [2021-04-10]. [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2\\_Volume2/V2\\_0\\_Cover.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_0_Cover.pdf)
- [25] 国家统计局国民经济核算司. 中国地区投入产出表(2012)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016
- [26] TRELOAR G J. Extracting embodied energy paths from input-output tables: towards an input-output-based hybrid energy analysis method[J]. Economic Systems Research, 1997, 9(4): 375
- [27] CHEN G Q, GUO S, SHAO L, et al. Three-scale input-output modeling for urban economy: carbon emission by Beijing 2007[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2013, 18(9): 2493
- [28] ZHANG Y, ZHENG H M, FATH B D. Analysis of the energy metabolism of urban socioeconomic sectors and the associated carbon footprints: model development and a case study for Beijing[J]. Energy Policy, 2014, 73: 540
- [29] FATH B D, PATTEN B C. Review of the foundations of network environ analysis[J]. Ecosystems, 1999, 2(2): 167
- [30] ZHAI M Y, HUANG G H, LIU L R, et al. Network analysis of different types of food flows: establishing the interaction between food flows and economic flows[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 143: 143

- [31] FANG D L, CHEN B. Ecological network analysis for a virtual water network[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(11): 6722
- [32] FATH B D, SCHARLER U M, ULANOWICZ R E, et al. Ecological network analysis: network construction[J]. *Ecological Modelling*, 2007, 208(1): 49
- [33] FATH B D. Network mutualism: positive community-level relations in ecosystems[J]. *Ecological Modelling*, 2007, 208(1): 56
- [34] 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
- [35] FATH B D. Quantifying economic and ecological sustainability[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2015, 108: 13
- [36] ZHAI M Y, HUANG G H, LIU L R, et al. Dynamic input-output analysis for energy metabolism system in the Province of Guangdong, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 196: 747
- [37] 吉林省政府网. 振兴吉林老工业基地规划纲要[EB/OL]. (2004-06-03) [2021-04-10]. [http://www.jl.gov.cn/zw/jcxxgk/ghjh/fzgh/201411/t20141119\\_6625465.html](http://www.jl.gov.cn/zw/jcxxgk/ghjh/fzgh/201411/t20141119_6625465.html)
- [38] 国家能源局. 《工业节能“十二五”规划》发布[EB/OL]. (2012-02-28) [2021-04-11]. [http://www.nea.gov.cn/2012-02/28/c\\_131435002.htm](http://www.nea.gov.cn/2012-02/28/c_131435002.htm)
- [39] DUAN C C, CHEN B. Energy-water nexus of international energy trade of China[J]. *Applied Energy*, 2017, 194: 725
- [40] 中华人民共和国中央政府网. 国务院关于东北振兴“十二五”规划的批复[EB/OL]. (2012-03-21) [2021-04-11]. [http://www.gov.cn/zwgk/2012-03/21/content\\_2096664.htm](http://www.gov.cn/zwgk/2012-03/21/content_2096664.htm)
- [41] 中国政府网. 三产首超二产 我国产业结构发生标志性转变[EB/OL]. (2014-03-01) [2021-04-11]. [http://www.gov.cn/xinwen/2014-03/01/content\\_2626189.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2014-03/01/content_2626189.htm)
- [42] GOERNER S J, LIETAER B, ULANOWICZ R E. Quantifying economic sustainability: implications for free-enterprise theory, policy and practice[J]. *Ecological Economics*, 2009, 69(1): 76

## Industrial sector correlation mechanism of regional carbon emissions: an empirical study of Jilin province based on ecological network analysis

SHI Zhimin<sup>1)</sup> LIU Zhonglin<sup>2)</sup> HAO Yan<sup>1)</sup> LIU Xiaoyu<sup>1)</sup> ZHANG Lixiao<sup>1)</sup>

(1) State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China; (2) Linyi City Ecological Environment Monitoring Center, 276000, Linyi, Shandong, China)

**Abstract** The target of peak carbon dioxide emissions and carbon neutrality puts forward new requirements for systematic energy saving and emission reduction of regional industrial economy. In this paper, an ecological network model based on environmentally extended input-output tables was developed to explore the carbon emission flow process among industrial sectors and analyze the correlation mechanism of industrial departments for carbon emission under the revitalization plan of the old industrial base in Northeast China. The results showed that: 1) The carbon emission of Jilin province increases significantly during the study period, from 254 million tons in 2002 to 436 million tons in 2017. The indirect carbon emission is the primary form. 2) Energy and resource related sectors are main controllers in the system, and the advantageous manufacturing and service sectors are the key gathering sectors in the system. With the demand for the development of technology-intensive industries in the revitalization policy, these sectors are playing an increasingly important role in the system. 3) The dominance of restriction/predation relationships among the sectors remained unchanged, while the number of competitive relationships decreased by 9.25%, and the number of symbiotic relationships increased by 6.61%. 4) The robustness index decreased from 0.32 to 0.31 due to the increase of redundancy and decrease of efficiency in the system, which is an unfavorable trend for regional sustainability development.

**Keywords** carbon neutral; ecological network analysis; environmentally extended input-output analysis; Northeast old industrial base; Jilin province

【责任编辑:刘先勤】