
能源代谢动态模拟诊断技术

城市化进程的加速发展导致城市出现能源短缺和代谢结构不合理的现象，因此城市能源系统的研究是可持续发展议题的重要组成部分，也是城市生态系统健康诊断的关键部分^[1]。“十四五”规划预计中国的城镇化率将达到 65%。这可能进一步增加生态环境压力，打破能源供需平衡现状。因此，有必要对城市能源使用管理进行探讨，从而反映城市内部和城市群之间极度复杂的能源代谢的互动关系，揭示系统各组分的内在演变规律，以实现社会经济可持续发展，为珠三角地区的能源生态风险预报预警和调控以及生态安全管理奠定基础^[2]。

珠三角地区凭借特殊经济优势，在发展清洁能源，开展常规能源技术创新与推进常规能源消费革命方面处于全国领先地位^[3]。但是受限于“缺煤少油乏气”的资源禀赋，珠三角地区位于我国常规能源供应链末端，易受极端气候、运输条件破坏及市场供需紧张、国际地缘政治等多种外部因素影响，存在一定的常规能源供应安全风险；该区域对国外能源供应的依赖程度高达 80%以上，经济发展和生活所需的大部分能源长期取决于从省外购买或进口，抵御能源风险能力不足；常规能源效率有待继续提升，珠三角单位 GDP 能耗约为东京湾区的 2.3 倍、英国的 2.0 倍、德国及欧盟的 1.4 倍与日本的 1.3 倍；化石能源消费占比依然较高，与国际先进水平存在较大差距，煤炭消费比重高于美国（13.78%）、日本（25.87%）、德国（20.50%）14、1.2 与 6.6 个百分点，与世界平均水平（27.21%）接近；同时，珠三角内部高耗能产业分布不均，可能引起产业结构的深层次矛盾^[4]。

此外，“十三五”规划不仅提出了总能耗（即 50 亿吨标准煤）的要求，而且还要求改善清洁能源供应并建立清洁高效的现代能源系统。调整能源结构，改变能源发展方式，是保证能源供应安全和生态安全的必由之路。因此，有必要优化能源组成，以支持“十四五”规划目标，进而在能源利用方面提供更有针对性的建议。探索不同类别能源的代谢状况有助于为区域可持续发展选择更合适的能源。此外，一次能源的不可再生性使得寻找相应的替代能源十分必要。珠三角作为中国经济最发达的地区之一，这种情况更加明显。因此，本研究围绕珠三角的能源代谢系统，探寻不同能源类型的使用对城市群能源代谢系统的动态影响，为城市群生态系统的健康诊断提供能源要素层次的详细分析。

针对珠三角的能源代谢系统问题,本研究开发了动态能源代谢模拟诊断技术。为研究不同能源类型的影响,本研究分析了九个能源组,包括所有能源、一次能源、二次能源和六种典型能源,选取了煤炭、原油、天然气、电、热和液化石油气为典型能源;一次能源组主要是一次能源(即煤、原油和天然气)的总和;二次能源组包括三种主要的二次能源(即电、热和液化石油气);所有能源组是指一次能源和二次能源的总和。采用投入产出分析和生态网络分析相结合的方法,构建物理能源投入产出表,从系统角度评估城市能源代谢系统的结构和功能,改进了系统鲁棒性分析方法,开发了可替代指标和间接效应指标。研究年份为2000年、2002年、2005年、2007年、2010年和2012年。计算了九个不同的能源组的代谢情况,即分别将9个不同能源组的数据输入不同年份下的能源代谢系统,得到不同能源组的系统代谢状态。

具体地,对每个年份的每个能源组,第一步通过能源强度将货币投入产出表转化为物理投入产出表,以更客观的评价能源代谢性能的有效性。第二步应用生态网络分析中的流量分析、效用分析、控制分析、结构分析等方法分析能源代谢系统(例如,在区分能源流动方向的基础上,判定各部门对系统的控制依赖程度),并改进了系统鲁棒性的计算方法,以明确影响系统鲁棒性的具体部门。同时,提出了可替代指标来探索各部门最佳的替代能源,提出了间接效应指标来追踪间接能源流动的变化趋势。每个年份中的九个能源组均重复上述运算,总共重复计算54次。第三步对结果进行整理,提取有效的信息以试图发现能源代谢的规律性变化趋势。

其中,为了揭示整个系统的能源可替代性,提出了可替代指标(alternative indicators, ALI),其计算公式如下:

$$\begin{cases} a_{ji} = 1 & , a_{ji} \geq 0 \\ a_{ji} = 0 & , a_{ji} < 0 \\ b_{ji} = 1 & , b_{ji} \geq 0 \\ b_{ji} = 0 & , b_{ji} < 0 \end{cases} \quad \begin{cases} a_{ij} = 1 & , a_{ij} \geq 0 \\ a_{ij} = 0 & , a_{ij} < 0 \\ b_{ij} = 1 & , b_{ij} \geq 0 \\ b_{ij} = 0 & , b_{ij} < 0 \end{cases}$$

$$ALI = \frac{\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n (|a_{ji} - b_{ji}| - 1)(|a_{ij} - b_{ij}| - 1) + n}{\sum n} \quad (i \neq j)$$

$$ALI = \frac{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (|a_{ij} - b_{ij}| - 1)(|a_{ji} - b_{ji}| - 1) + n}{\sum n} \quad (i \neq j)$$

其中, $a_{ij}, a_{ji}, b_{ij}, b_{ji} (i, j = 1, 2, 3, \dots, 28)$ 为两种不同能源流动 **U** 矩阵的值; n 为子部门的总个数。

可替代指标被用来为系统中的某种能源找到替代能源。由于系统的随机性和不确定性,有必要确定替代能源以在短时间内保持系统的相对稳定性。该指标是从积分效用强度矩阵演变而来的,它计算了不同能源流中相同生态关系的数量,以确定系统中某种能源中最相似的能源形式。使用可替代指标,可以找到部门的最佳替代能源,也就是说,如果某个部门中的能源短缺,我们可以选择某种替代能源来短期维持系统的相对稳定性。该指标的分析不仅有助于一个部门的稳定,而且有助于特定组成部分甚至整个生态系统的能源平衡。当 $a_{ji} = b_{ji}$ 且 $a_{ij} = b_{ij}$ 时, ALI 等于 1, 此时该能源形式不可替代。否则,较高的 ALI 表示能源选择的可替代性较强,当打破以前的能源利用模式时,这些能源类型将是最佳替代选择。

为了反映间接流动的影响程度,本研究提出了间接效应指标。该指标基于动态分析流程,结合不同情景来追踪能源流动的不确定性和多样性:

$$\begin{cases} d_{ij}=1 & , d_{ij}>0 \\ d_{ij}=1/2 & , d_{ij}=0 \\ d_{ij}=0 & , d_{ij}<0 \end{cases} \quad \begin{cases} u_{ij}=1 & , u_{ij}>0 \\ u_{ij}=0 & , u_{ij}<0 \end{cases}$$

$$\mathbf{IEI} = \frac{\sum_{i=p}^q \sum_{j=p}^q [|d_{ij} - u_{ij}|]}{(q-p+1)^2}$$

其中, \mathbf{IEI} 为间接效应指标,反映间接流量对系统的影响; p, q 均为准备研究部门的编号。

IEI 能够量化间接效应，使研究者能够更清楚地了解流动循环的复杂性。因此，比较于其他分析方法，该指标可以为政府更全面地提供协同和多角度的政策指南。

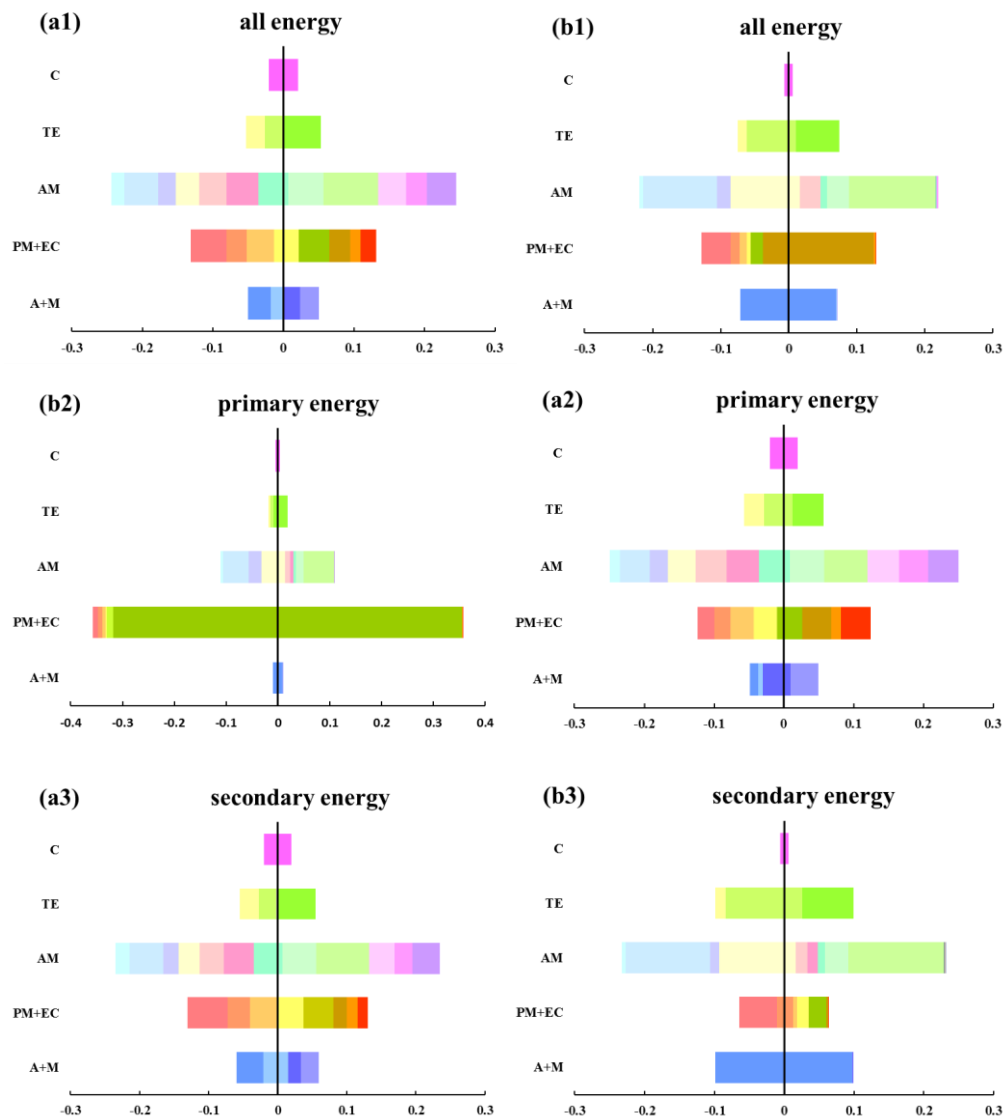


图 1 能源生态代谢层级图 (所有能源、一次能源、二次能源)

研究表明，珠三角城市群的能源代谢处于亚健康状态。其中，先进制造业是推动经济增长的主要部门，它具有最大的推动力。而下游产业具有拉动力高、驱动力低的特点，说明其生产结构有待改进，无法有效地将能源传递给高耗能部门（详见图 1）。通过考虑不同能源的流动，我们发现，拉动力的大小不受能源类型影响，相反，驱动力对能源类型非常敏感，这与生产和消费活动密切相关，因为

生产者可以根据其生产结构选择不同的能源，而消费者不能。总的来说，剥削关系支配整个系统，占 50% 以上。竞争关系排第二位，约占 30%（从 32% 到 39%），其次是共生关系接近 20%（详见表 1）。

表 1 不同能源流中的能源生态相互关系

类型	剥削关系		竞争关系		互惠关系	
	数量	百分比	数量	百分比	数量	百分比
所有能源	208	51.23%	119	29.31%	79	19.46%
一次能源	205	50.49%	123	30.30%	78	19.21%
二次能源	214	52.71%	108	26.60%	84	50.69%

具体而言，拉动力层级（图 1（a））表示需求的程度以及子部门对系统的依赖程度。如果所有层均形成倒金字塔结构，则表明上游子部门对下游子部门具有显著拉动功能。上游消费者从下游和中游获得更多投入，因此拉动了下游部门的发展。同样，驱动力层级（图 1（b））表示每个子部门的影响及其诱发下游子部门变化的能力。如果新陈代谢系统是健康的，则这两个层次结构将分别显示金字塔和倒金字塔结构，识别结构中不符合这些形状的任何层都可以揭示导致系统内部问题的瓶颈子部门。

在图 1（a1）中，Con 部门的拉力大大不足，权重小于 5%。它位于层次结构的最高级别，不能有效地拉动较低级别的部门。另一个不适当的情况发生在 TE 部门，其拉力仅为 10.6%。属于第三产业的子行业 OSS 占该比例的一半（即 5.5%），排名第二。研究表明，尽管服务业存在许多问题，例如珠三角内区域发展不平衡，但它却是导致能源代谢层次上层的主要拉动力。图 1（b1）显示，Agr 和 Min 部门的驱动力都很小，不到总驱动力的 15%，这表明这些部门的生产远远落后于对其产品的需求。这反映了珠三角的大部分农产品和矿产产品都是从其他省份和国家进口的事实，导致交付能力低下。不规则的金字塔结构主要是由于 AM，PM 和 EC 部门的驱动力权重过大或过小，这意味着基础供应商无法很好地促进和支持上级消费者。

另外，Min 部门具有较高的拉力（即 6.83%）和较低的驱动力（即 0.18%），这表明采矿产品从其他行业接收能源的能力强于其传递能源的能力。但是，Min 部门的产品主要用于下游行业。例如，煤矿工业的产品主要用于其他领域，例如 EC 和 Con 领域。石油和天然气工业的产品主要分布在石油加工，化工和其他高能耗支柱产业。因此，有必要规范采矿业的结构，以提高能源转化和利用过程中的驱动力。

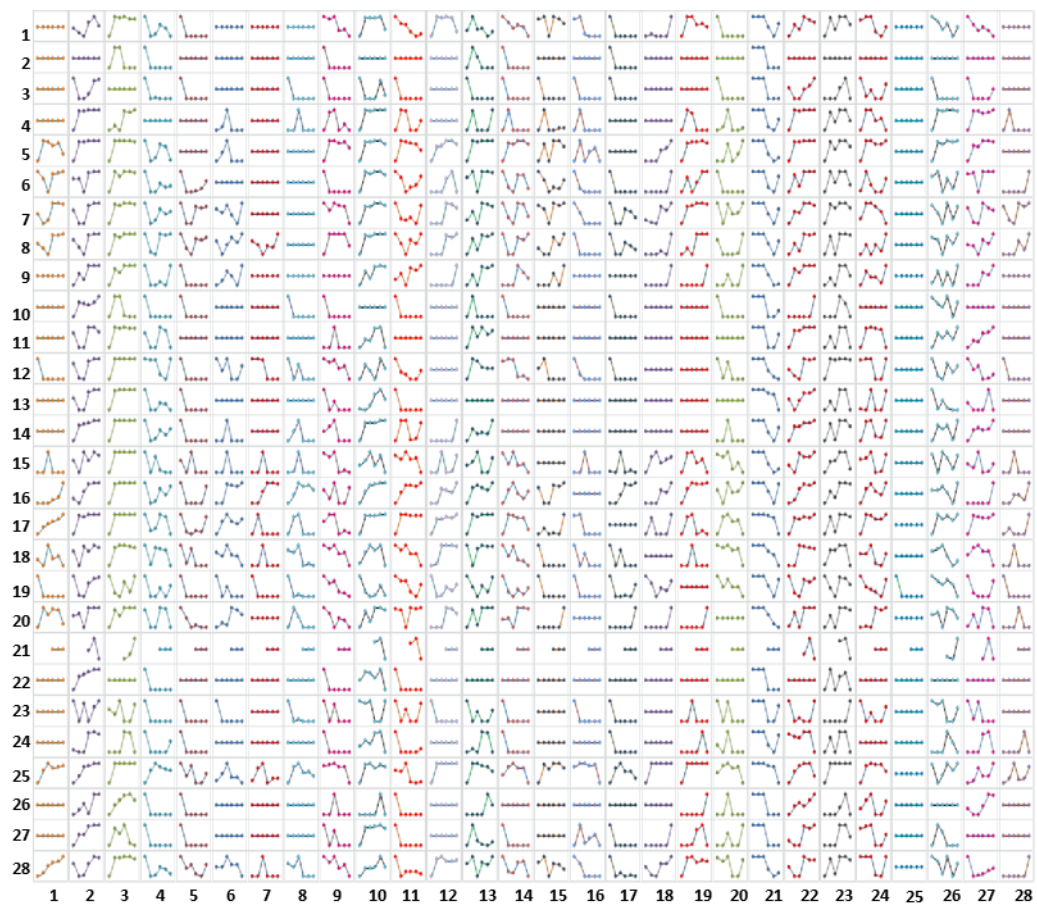


图 2 部门之间的成对控制关系

各部门间的控制关系在研究年份中呈现动态变化，结果如图 2 所示。其中，第二行和第三行中的大多数曲线是水平线，这意味着其他组件在能源交易交互期间依赖于能源提取部门和金属矿石开采部门。部门 15 到 20(通用专用机械制造、运输设备制造、电机设备制造、通信设备、计算机及其它电子设备的制造、文化活动和办公室工作测量仪器和机械的制造、工艺品及其他制造业)总是处于依赖

其他部门的状态。虽然它们是珠三角的支柱产业，但仍然需要依靠来自其他部门的能源供应。纵向分析发现，与能源流动密切相关的电力与热力生产部门、热气部门和水生产部门总是控制其他部门。它们主要将一次能源转化为可被其他部门利用的二次能源。

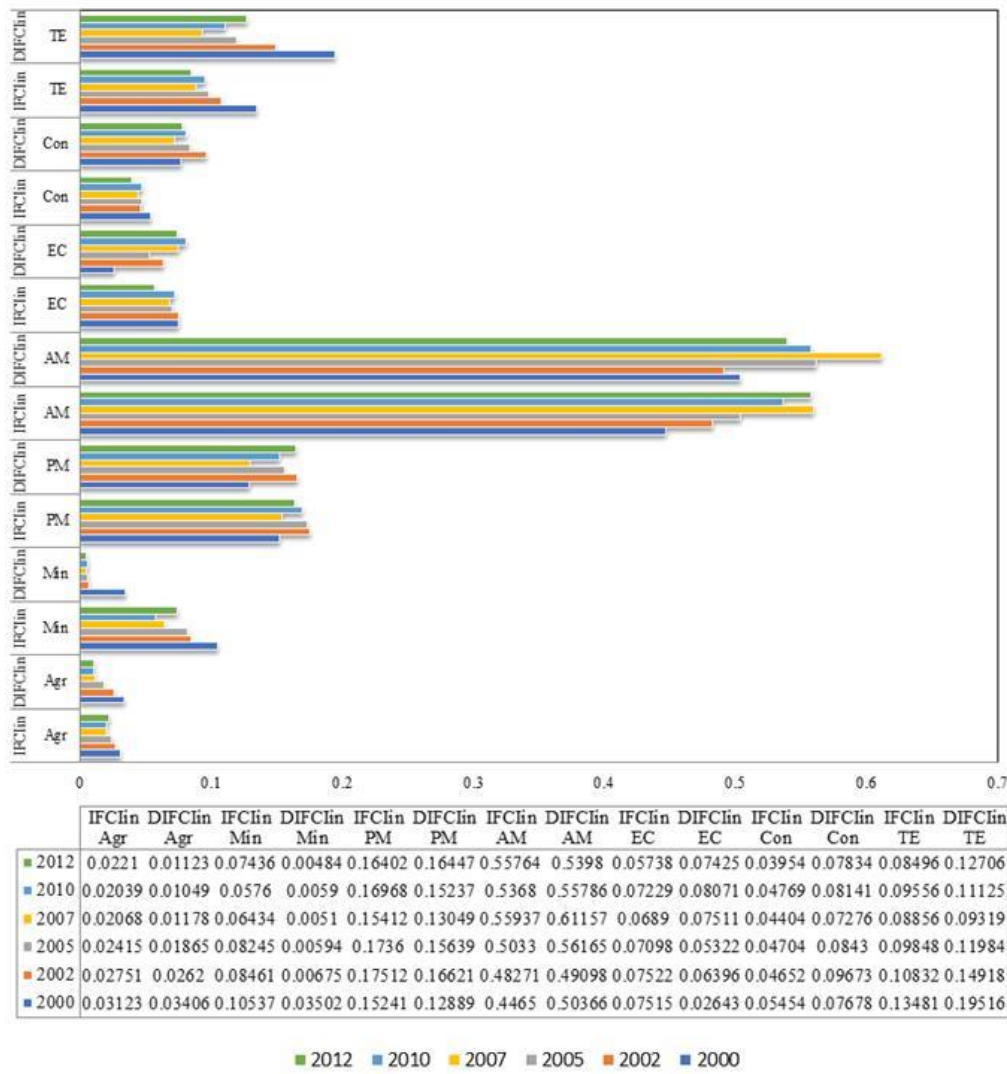


图 3 部门的输入方向上的积分 FCI 和直接 FCI 值（2000，2002，2005，2007，2010，2012 年）

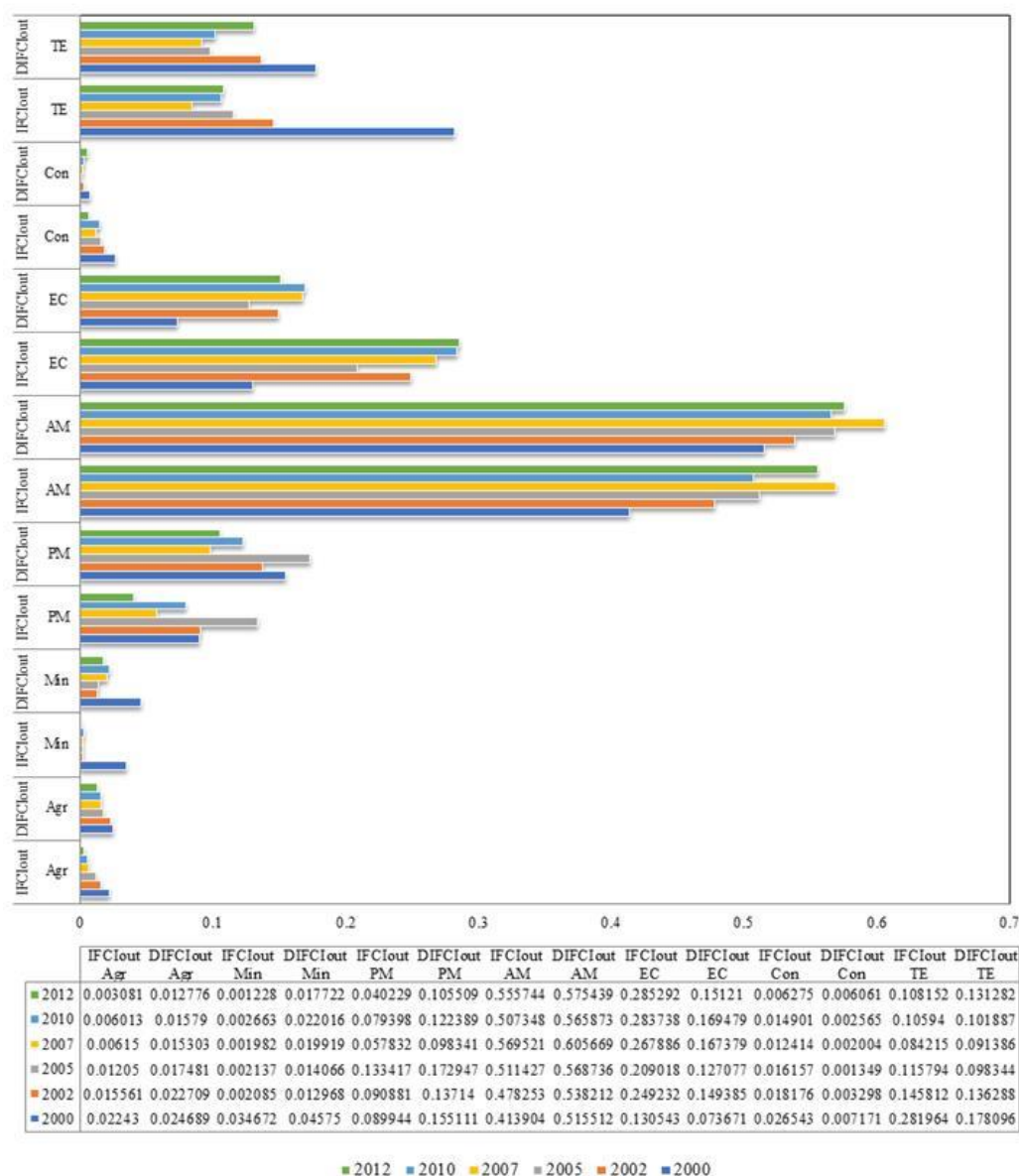


图 4 各部门的输出方向上的积分 FCI 和直接 FCI 值（2000，2002，2005，2007，2010，2012 年）

直接 FCI 值仅考虑直接控制效应的影响，而积分 FCI 值以一种更全面的方式显示控制强度，因为它不仅结合了直接和间接的影响，而且考虑了能源流动方向。以图 3 中的输入方向的 FCI 值和图 4 中的输出方向的 FCI 值来共同评价各部门如何通过能源输入对系统控制关系施加影响：农业部门无法高效利用其他部门传递的能源；农业部门、采矿业部门和建筑业部门在能源利用方面对系统的重要性较低；由于间接互动的影 响，系统对采矿业部门的要求程度实际上比我们想象中要强得多；采矿业部门具有接受能源效率高和能源传递效率低的特点，而能

源转换部门恰恰相反，其中采矿业部门大多通过间接方式接受其他部门的能源；建筑业和服务业并不善于从其他部门接收能源，同时这两个部门在向其他部门输送能源的过程中经历了相对复杂的路径；先进制造业表现出不可替代性，是促进其他行业健康发展乃至整个珠三角的能源代谢最为重要的部门。

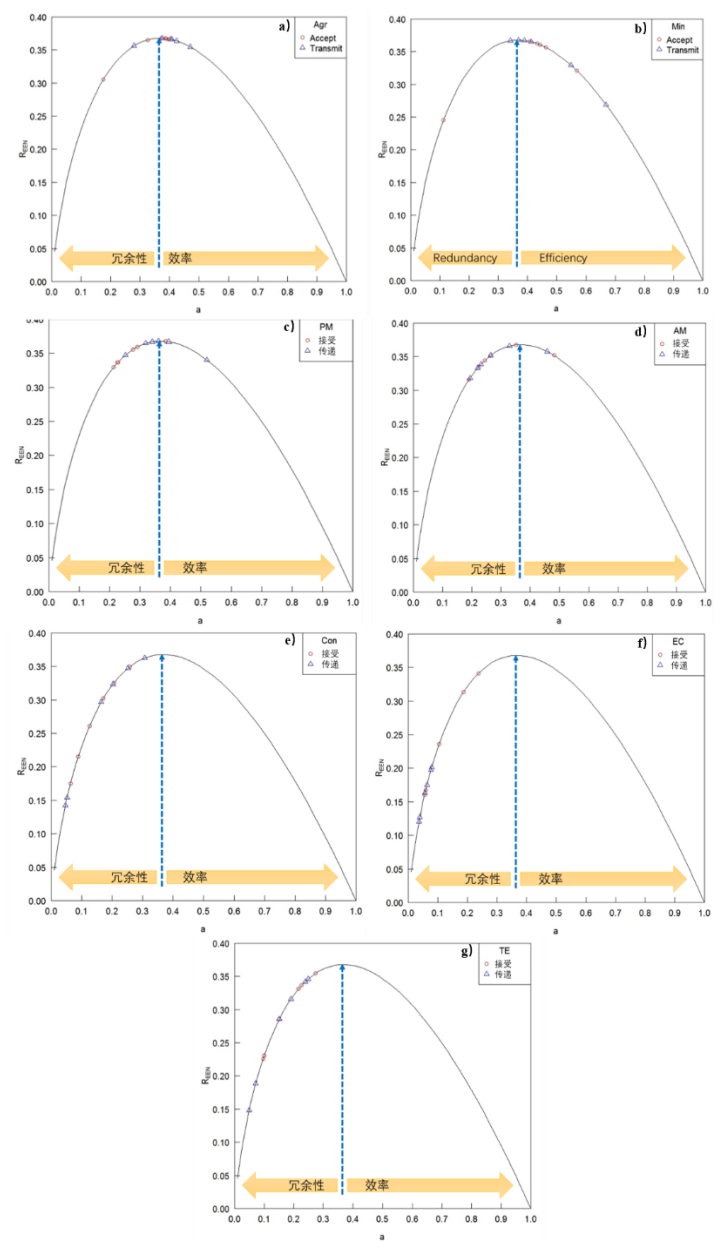


图 5 每个部门对生态网络系统 a 和 R 值关系的影响

系统鲁棒性是由各部门效应相互叠加而形成的。研究发现，AM 部门对系统效率和冗余的贡献最大。2002 年，各部门接受和转移能源的能力较强，对提

高系统效率有重要影响。而冗余度的最高值出现在 2000 年，体现在各部门对能源的接收和传递上，这说明能源流动方向并不影响系统效率。每个部门的 a 值的计算结果如图 5 所示。部门 EC 对能源流动方向最敏感，因为其接受能源的相对效率远远大于传递能源，它的值多集中在冗余的范围内。大多数年份部门 PM，AM，Con 和 TE 限制了系统的效率，这可能是因为有复杂的间接能源流隐藏在这些部门的各种产品的产品或服务中。相反，Agr 部门和 Min 部门都致力于提高系统的整体效率，这意味着它们没有可以破坏系统的平行的路径选择。2002 年，这些部门在提高系统效率方面的贡献主要集中在能源输送过程中。Min 部门对系统效率的贡献最大，表明该部门抵御风险变化的能力是最小的。在 2000 年，除 Min 部门外，所有部门的作用是维持系统稳定。

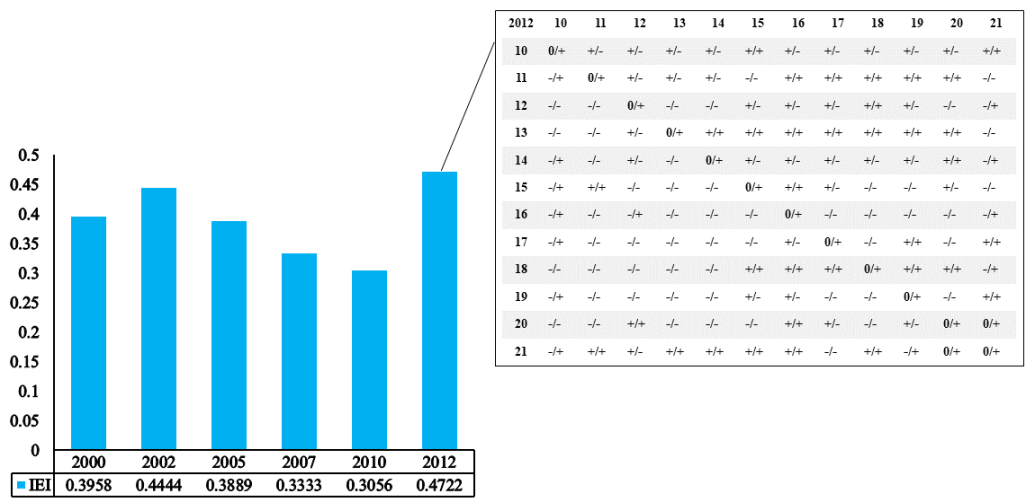


图 6 2000-2012 年 AM 部门 IEI 的变化

图 6 显示了 AM 部门间接替代指标随时间的变化情况。很明显，间接效应可能会改变各组成部分之间的效用关系。以 2012 年为例，可以发现，其中一些变化往往会产生积极影响（即从“-”到“+”，从“0”到“+”），而另一些变化则会产生消极影响（即从“+”到“-”）。通过间接效应指数（IEI）对 AM 部门的影响值在 0.3~0.5 之间变化较大，说明我们一直忽略的间接效应对整体效用强度的影响较大。然而，这种间接效应受到行业发展水平、市场供求和政府政策取向等诸多因素的影响。因此，寻找间接流动的轨迹是很复杂的。

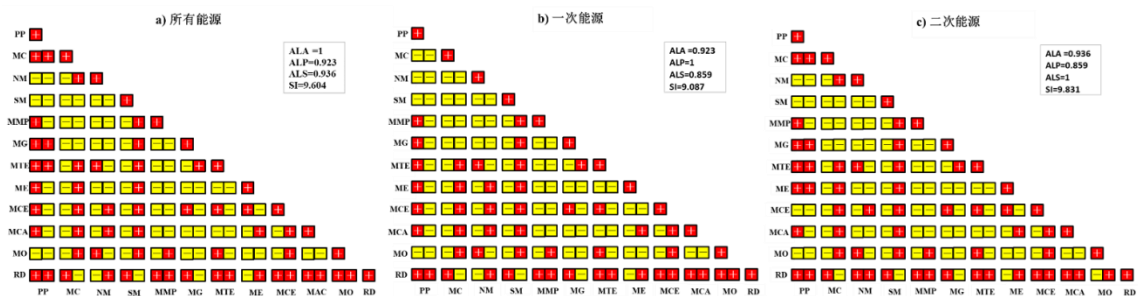


图 7 部门积分效用关系

图 7 中可替代指标的值的的大小可以表示能源替代能力。二次能源的 SA 值（即 0.936）大于一次能源的 SA 值（即 0.923），这表明二次能源更可替代以保持 AM 部门的稳定和发展。如果能源匮乏，则可以通过在短时间内增加二次能源份额来维持材料制造部门的相对能源稳定性。MC、MG、MTE 和 PP 之间的代谢关系在所有能源组和二次能源组中都是互利的。但在一次能源组的情况下，MG 和 MTE 开发 PP 的情况发生了变化，其中，PP 部门的产品在能源代谢过程中的中间需求率较高。因此，必须在提高煤焦油和焦炉煤气综合利用水平的同时，不断延伸焦油、甲醇、醋酸等基础产品的产业链。在二次能源组中，有 5 对代谢关系发生了变化。（ME，PP）和（RD，NM）是共生关系，说明这两对子部门可能会提高二次能源利用的比重。（RD，MO）成为开采关系，这表明这两个子部门应该保持原来的能源利用率。（MCE，PP）和（MCA，NM）都变成了竞争关系，这意味着如果总能源有限，其中一个就不能满足。

综上所述，珠三角城市群的能源代谢处于亚健康状态。未来可考虑重点发展先进制造业，因为其是推动经济增长的主要部门。下游产业的生产结构有待改进，因其无法有效地将能源传递给高耗能部门。同时，未来应当重视能源利用的间接效应，其对整体效用的影响较大。然而，这种间接效应受到行业发展水平、市场供求和政府政策取向等诸多因素的影响。由于间接互动的影 响，系统对采矿业部门的要求程度实际上比我们想象中要强得多；采矿业部门具有接受能源效率高和能源传递效率低的特点，而能源转换部门恰恰相反，其中采矿业部门大多通过间

接方式接受其他部门的能源；建筑业和服务业并不善于从其他部门接收能源，同时这两个部门在向其他部门输送能源的过程中经历了相对复杂的路径；先进制造业表现出不可替代性，是促进其他行业健康发展乃至整个珠三角的能源代谢最为重要的部门。

参考文献

- [1] Faheemullah S, Qiang J, Ying F. Evaluating China's natural gas supply security based on ecological network analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2016,139.
- [2] 穆献中, 朱雪婷. 城市能源代谢生态网络分析研究进展[J]. 生态学报, 2019,39(12):4223-4232.
- [3] 李仁鹏. 低碳经济视角下我国一次能源消费结构的优化[J]. 财经界, 2015(02):26.
- [4] 杨蕾, 许军. 基于能流图的广东能源供应安全分析[J]. 生态经济, 2013(05):86-91.