
大气污染代谢系统的析因分析及减排政策模拟

城市化和工业化进程的加快在推进经济增长、改善生活条件的同时，也带来了全球变暖、酸雨、光化学烟雾和雾霾等大气污染问题。这些问题严重危害了自然生态和公共健康，为城市生态系统健康且可持续性地发展带来巨大挑战。

世界卫生组织指出，世界范围内每年约有 700 万人因为大气污染引起的相关疾病而过早死亡^[1]。大气污染物种类繁多，生态环保部监测与统计的影响大气环境的主要污染物包括：细颗粒物（PM_{2.5}）、氮氧化物（NO_x）、二氧化硫（SO₂）、一氧化碳（CO）、臭氧（O₃）及挥发性有机物（VOCs）。其中，PM_{2.5}排放来源众多，包括能源燃料使用、钢铁生产以及建筑公路扬尘等，已被列为影响城市生态环境质量、危害人体健康的主要污染物^[2]；NO_x来自于汽车尾气排放以及工业生产等，具有毒性，能够对人及各种动物的呼吸道产生强烈刺激作用甚至引发病变，同时也可造成植物叶片枯黄^[3]；SO₂主要来源为工业生产过程中煤或石油的消耗，分布较广且影响较大，是区域酸雨污染的关键前体^[4]；而来源于内燃机废弃、化石燃料燃烧的 CO，则是大气中分布最为广泛的污染物，若局部含量过高就会对人类健康产生危害^[5]；另外，O₃是大气层的重要组分，但局部 O₃含量一旦超标，就会引起多种健康问题，如侵蚀人眼、呼吸道等^[6]；VOCs是大气中 O₃和二次有机气溶胶（SOA）的关键前体物。VOCs与 NO_x在光照条件下通过光化学反应生成 O₃从而形成光化学烟雾污染。因此，复杂的大气污染问题已经严重影响了大气、森林，水体、城市等多层生态的健康状态，特别是在经济飞速发展的地区。

珠三角城市群作为中国经济发展最快速的城市群之一，也面临着严重的大气污染问题。珠三角城市群产业结构严重依赖能源资源，2019 年其能源总消费量达到 3.7 亿吨标准煤，占全国总用量的 7.1%。其能源的生产消费过程会导致各类大气污染物的大量集中排放，例如，珠三角地区是典型的 VOCs-控制型 O₃生成区域，VOCs 中的芳香族化合物和烯烃对 O₃产生的贡献尤为明显。如果不加以合理评估与控制，将会造成该区域生态环境不断恶化。为了解决大气污染所造成的一系列生态问题，广东 2002 年就率先采取了减排措施并签署《珠江三角洲地区空气质素管理计划》以此减少 NO_x、SO₂、PM₁₀、VOCs 的排放^[7,8]。2012 年，广东与香港通过了一项后续减排计划，截至 2020 年将进一步减少大气污染物排

放。如何在保持经济稳步增长和居民生活水平逐步提高的同时，达到减排目标，改善区域空气质量，这是保障珠三角城市群生态健康所面临的挑战，也是关乎政策制定的首要难题^[9-11]。

因此，本研究开发了基于大气污染对城市健康影响的析因分析及城市健康诊断技术框架与模型来揭示珠三角城市群大气污染物代谢系统在局部和整体两个层面的结构复杂性及城市生态内在属性，探究城市生态健康网络特征的实际含义与政策启示，为城市生态系统健康演进和系统减排效果优化提供理论指导和政策建议，实现珠三角地区的可持续发展。

城市健康政策模拟技术框架主要由三个部分组成：首先，在城市代谢理论框架下提出健康因子环境投入产出模型（FEIO），构建城市大气污染物的协同网络架构，以辨识生态系统结构特征，揭示系统内在属性。其次，由于健康的城市生态网络架构充分考虑了各种大气污染的环境危害性，研究基于复杂网络理论识别关键部门及其交易关系。最后引入因子设计方法来探究设计因子及其交互关系对系统的潜在影响。

析因分析（FA）最初用于实验设计，能够探索多个因素对响应变量的影响。特别是当设计因素与响应变量之间存在非线性关系时，该方法可以分析和分解设计因子对响应变量的影响，包括各因子的主效应和因子间的复杂交互作用。与其它统计方法相比，析因分析能够通过处理不同层次因子变化时系统响应的曲线特征，量化模型输出对主要因子及其组合的敏感性。以双因子的设计为例，单因子的主效应和两因子交互作用的统计效应模型和平方和表示为：

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

$$SS_A = \sum_{i=1}^I \left(\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Y_{ijk} \right)^2 / JK - \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Y_{ijk} \right)^2 / IJK$$

$$SS_B = \sum_{j=1}^J \left(\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K Y_{ijk} \right)^2 / IK - \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Y_{ijk} \right)^2 / IJK$$

$$SS_{AB} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left(\sum_{k=1}^K Y_{ijk} \right)^2 / K - \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Y_{ijk} \right)^2 / IJK - SS_A - SS_B$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Y_{ijk}^2 - \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Y_{ijk} \right)^2 / IJK$$

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB}$$

式中, i 和 j 分别表示因子 A 和 B 的水平个数 ($i=1,2,3,\dots,a; j=1,2,3,\dots,b$); Y_{ijk} 是当因子 A 为第 i 个水平且因子 B 为第 j 个水平的第 k 次重复试验的系统观测值 ($k=1,2,3,\dots,n$); μ 是整体平均效应; τ_i 是因子 A 等于第 i 个水平值的效应, β_j 是因子 B 等于第 j 个水平值的效应, $\tau\beta_{ij}$ 是因子 A 和因子 B 的交互效应; ε_{ijk} 是随机残项; SS_A, SS_B 和 SS_{AB} 代表因子 A , 因子 B 以及他们之间交互的平方和; SS_T 和是残差项以及系统总体的平方和。 $y_{i..}$, $y_{.j.}$ 和 $y_{ij.}$ 分别是是因子 A 处于第 i 个水平, 因子 B 等处于第 j 个水平以及他们之间交互的的观测值总和; $y_{...}$ 是系统所有观测值总和; 各因子以及因子间的交互的贡献度可以通过平方和求得。

其次, 建立动态城市生态系统大气污染解析模型模块 (DRA), 以此揭示社会经济因素与区域大气污染物排放变化的内在关联性及对城市生态健康的外在耦合度。将结构分解分析方法 (SDA) 分别引入 Leontief-demand IO 框架和 Ghosh-supply IO 框架, 从社会需求和供应两个层面揭示社会经济因素对区域环境的影响, 结合排放解构分析 (EDA) 确定关键的社会经济因素, 帮助决策者厘清社会经济与城市环境变化及其与生态健康的关联耦合程度。

具体地, 使用 SDA 分解了 2005 年至 2015 年大气污染物当量排放量 (APE) 的变化, 基于 Leontief 需求 IO 和 Ghosh 供应 IO 框架, 将基于消费的排放量 (CBE) 和基于收入的排放量 (IBE) 分解为五个子因素:

$$CE = \mathbf{E}^{APE} \mathbf{L} \mathbf{Y} = \mathbf{E}^{APE} \mathbf{L} \mathbf{D} \mathbf{f} p$$

$$IE = \mathbf{V} \mathbf{G} \mathbf{E}^{APE'} = p \mathbf{m} \mathbf{N} \mathbf{G} \mathbf{E}^{APE'}$$

式中, $n \times k$ 阶的矩阵 \mathbf{D} 表示最终需求的结构; $k \times 1$ 阶的向量 f 表示人均最终需求水平; p 代表珠三角城市群总人口; 矩阵 \mathbf{S} 表示主要投入的结构; 向量 \mathbf{m} 是

人均初始投入水平。从时期 t_0 到 t_1 ($t_0 < t_1$) 的 APE 排放量变化可分解为以下公式:

$$\begin{aligned}\Delta CE &= CE_{t_1} - CE_{t_0} = \mathbf{E}^{APE}_{t_1} \mathbf{L}_{t_1} \mathbf{D}_{t_1} f_{t_1} p_{t_1} - \mathbf{E}^{APE}_{t_0} \mathbf{L}_{t_0} \mathbf{D}_{t_0} f_{t_0} p_{t_0} \\ &= \Delta \mathbf{E}^{APE} \mathbf{L} \mathbf{D} f p + \mathbf{E}^{APE} \Delta \mathbf{L} \mathbf{D} f p + \mathbf{E}^{APE} \mathbf{L} \Delta \mathbf{D} f p + \mathbf{E}^{APE} \mathbf{L} \mathbf{D} \Delta f p + \mathbf{E}^{APE} \mathbf{L} \mathbf{D} f \Delta p \\ &= \Delta \mathbf{E}^{APE} \mathbf{L}_{t_1} \mathbf{D}_{t_1} f_{t_1} p_{t_1} + \mathbf{E}^{APE}_{t_0} \Delta \mathbf{L} \mathbf{D}_{t_1} f_{t_1} p_{t_1} + \mathbf{E}^{APE}_{t_0} \mathbf{L}_{t_0} \Delta \mathbf{D} f_{t_1} p_{t_1} \\ &\quad + \mathbf{E}^{APE}_{t_0} \mathbf{L}_{t_0} \mathbf{D}_{t_0} \Delta f p_{t_1} + \mathbf{E}^{APE}_{t_0} \mathbf{L}_{t_0} \mathbf{D}_{t_0} f_{t_0} \Delta p\end{aligned}$$
$$\begin{aligned}\Delta IE &= IE_{t_1} - IE_{t_0} = p_{t_1} m_{t_1} N_{t_1} \mathbf{G}_{t_1} \mathbf{E}^{APE'}_{t_1} - p_{t_0} m_{t_0} N_{t_0} \mathbf{G}_{t_0} \mathbf{E}^{APE'}_{t_0} \\ &= \Delta pmN \mathbf{G} \mathbf{E}^{APE'} + p \Delta mN \mathbf{G} \mathbf{E}^{APE'} + pm \Delta N \mathbf{G} \mathbf{E}^{APE'} + pmN \Delta \mathbf{G} \mathbf{E}^{APE'} + pmN \mathbf{G} \Delta \mathbf{E}^{APE'} \\ &= \Delta pm_{t_1} N_{t_1} \mathbf{G}_{t_1} \mathbf{E}^{APE'}_{t_1} + p_{t_0} \Delta mN_{t_1} \mathbf{G}_{t_1} \mathbf{E}^{APE'}_{t_1} + p_{t_0} m_{t_0} \Delta N \mathbf{G}_{t_1} \mathbf{E}^{APE'}_{t_1} \\ &\quad + p_{t_0} m_{t_0} N_{t_0} \Delta \mathbf{G} \mathbf{E}^{APE'}_{t_1} + p_{t_0} m_{t_0} N_{t_0} \mathbf{G}_{t_0} \Delta \mathbf{E}^{APE'}_{t_1}\end{aligned}$$

最后, 构建网络减排模拟模型模块 (DPS) 以促进减排政策的开发。所有部门将依据生态关系的种类重新分类, 再针对不同部门类别分别模拟基于生产和消费的策略方案, 以揭示各种城市生态健康评估政策的有效路径以及识别城市生态系统的健康稳定的影响, 运用大气污染当量法对各部门产生的不同类型的污染物进行合并, 以综合模拟珠三角城市群多种大气污染物的代谢过程并充分反映各类污染物的环境危害性。

表 1 20 个国民经济部门划分及其简称

序 号	简称	部门
1	FA	农业, 林业, 畜牧业, 渔业和水利业
2	MI	采矿业
3	FP	食品加工业
4	GT	服装加工业
5	FM	木材加工业
6	PP	造纸业
7	PPC	石油加工和焦化
8	CP	化学品制造业
9	MMN	金属制造业和非金属矿产制造业

10	GM	一般机械制造业
11	TE	交通运输设备制造业
12	EEM	电气机械及器材制造业
13	ETE	通信设备、计算机及其他电子设备制造业
14	MCA	仪器仪表、文化办公机械制造业
15	MO	其他制造业
16	SW	废料和垃圾回收业
17	EP	电力制造业
18	CO	建筑业
19	TS	运输、仓储、邮政、电信服务业
20	OSE	其他服务业

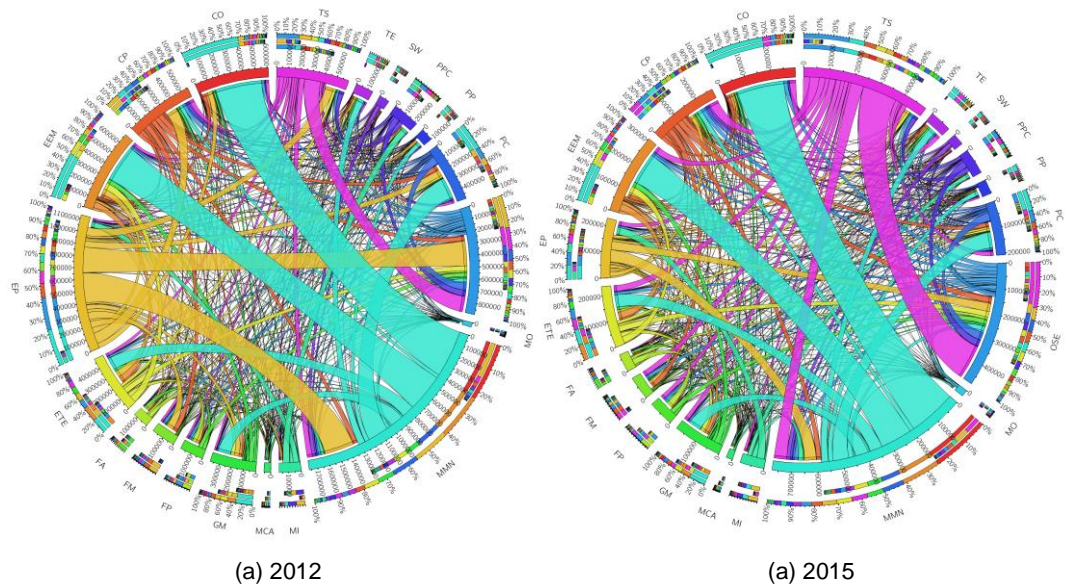


图 1 珠三角城市群 2012 年与 2015 年大气污染协同代谢网络

珠三角城市群 2012 年和 2015 年的 APE 代谢网络如图 1 所示。图中圆形内环中的不同弧形色块表示不同的国民经济部门，与部门相同颜色的轨迹表示该部门输出至其他部门的 APE 代谢流量，轨迹的宽度用来量化部门间的代谢流规模。图中圆形外环表示各流入或流出在总代谢量中所占的比例。APE 代谢网络的构成表明，珠三角城市群由部门间贸易引起的直接大气污染排放分布具有非均衡性。

以图 1（a）为例，2012 年 MMN 部门的 APE 代谢流输出量最大。MMN 部门向 CO 部门输出的 APE 总代谢量达到了 40.50 Mt，向 EEM 输出了 32.28 Mt，但向 FA 部门仅输出了 0.06 Mt。此外，2012 年至 2015 年，珠三角城市群 APE 代谢网络也发生了显著变化。2015 年珠三角城市群的 APE 直接代谢总量为 394Mt，约占 2012 年吞吐量的一半（816 Mt）。

鲁棒性是衡量系统运行健康状况的有效度量方法，常用于阐明系统优势度和冗余度之间的权衡关系。优势度和冗余度是表征城市大气污染代谢系统的两个对立方面，它们反映系统的结构特征。优势度表示系统效率，反映了系统的有序程度，而冗余度则表示系统的稳定性。

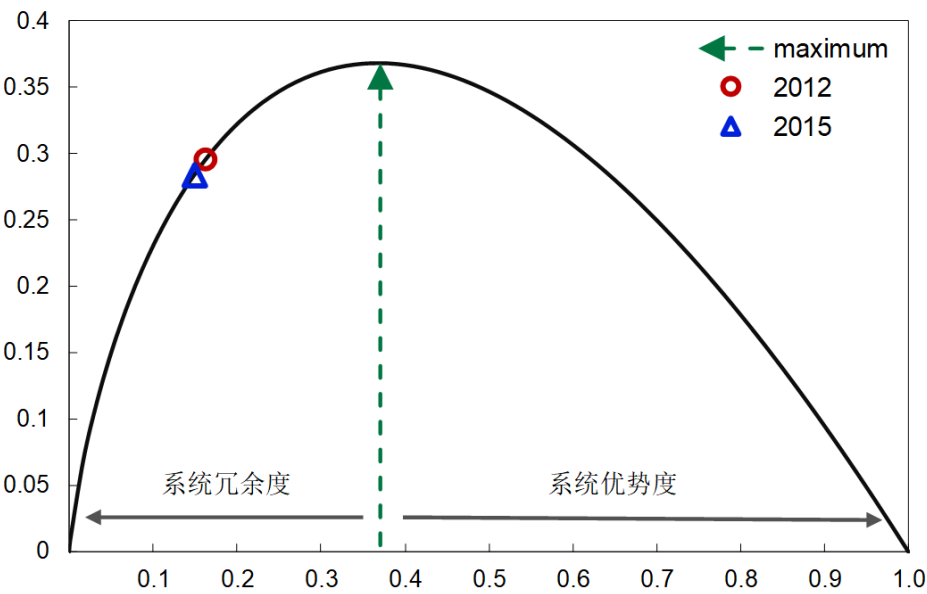


图 2 代谢系统鲁棒性分析

由图 2 可知，珠三角城市群大气污染代谢系统 2012 年鲁棒性为 0.30，而 2015 年的则为 0.27，这表明系统有序性存在一定程度的下降。此外，两个 R 点都位于曲线的左侧，这说明珠三角城市群大气污染代谢系统具有较高的冗余度和较低的优势度。2012 年其优势度为 0.70，2015 年则下降为 0.66。此外，与 2012 年（即 3.57）相比，2015 年的冗余度更高（即 3.79）。此类系统状态对于自然生态系统是一个良性的演化趋势，因为更高的冗余度意味着系统将更加稳定，从而能够更好地抵抗外部干扰。但是，对于城市大气污染治理这不是一个理想结果。冗余度

越高，城市大气污染代谢系统内代谢流就越分散，而不是集中在某几条的代谢路径上，这使应被实施大气污染物减排战略的关键部门及部门间贸易关系难以被确定。因此，进一步识别这些关键部门和贸易活动是为珠三角城市群制定减排政策的重要基础。

鲁棒性、优势度和冗余度是反映城市排放系统整体表现的三个有效指标，但这些指标无法反映代谢系统的内在结构。特别是对于如此复杂的城市大气污染代谢网络，识别关键路径及枢纽节点是诊断系统症结并定位减排管控关键靶点的必要前提。本课题开发的 FEIO 模型通过积聚各代谢路径的 APE 代谢流评估各个部门及其相关交易的系统中心性。为了更好地反映 APE 的结构特征，将所有计算的代谢网络中心性值（ c_{ij} ）按 0-1 进行标准化。采用热感图来凸显珠三角城市群 APE 代谢网络中最关键的的部门及贸易关系。

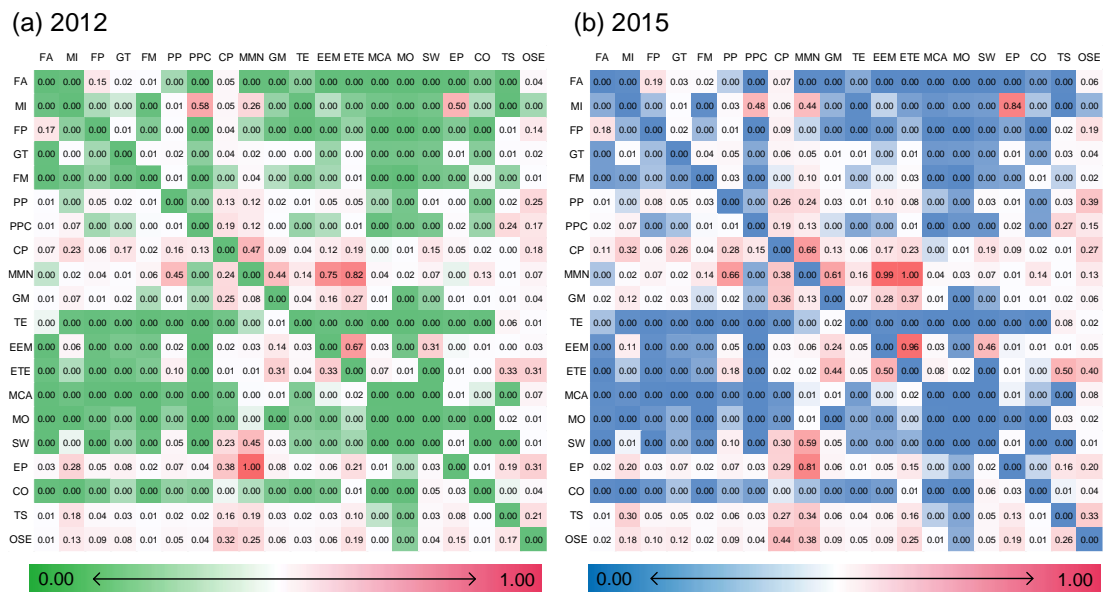


图 3 珠三角各部门间交易关系的网络中心性

图 3 显示了 2012 年和 2015 年所有部门间交易关系的中心性指数（ CI_{ij} ）。

CI_{ij} 的值表示上游部门 j 与下游部门 i 之间的交易关系在系统中的中心地位。以 2012 年为例，从 EP 部门到 MMN 部门交易关系的网络中心性可被 $CI_{17,9}$ 量化。

$CI_{17,9}$ 等于 1 说明在 2012 年该交易关系承担了最多的 APE 代谢流量。

MI、CP、OSE 这三个部门与 EP 的交易中隐藏着大量的 APE 代谢流入。该结果表明，一方面，这些下游部门（即 MMN、MI、CP 和 OSE）的生产需求需要被调节优化。另一方面，EP、MI 等输出大量 APE 代谢流的上游行业应被当做生产侧减排措施的重点实施对象。此外，图 3（a）与（b）中的热感分布相似，这意味着珠三角城市群供应链产生的 APE 排放主要集中在一些关键部门和贸易关系中。2012 至 2015 年期间，珠三角城市群因能源消耗引起的大气污染物排放总量虽然下降了近 50%，但代谢结构并未得到优化。

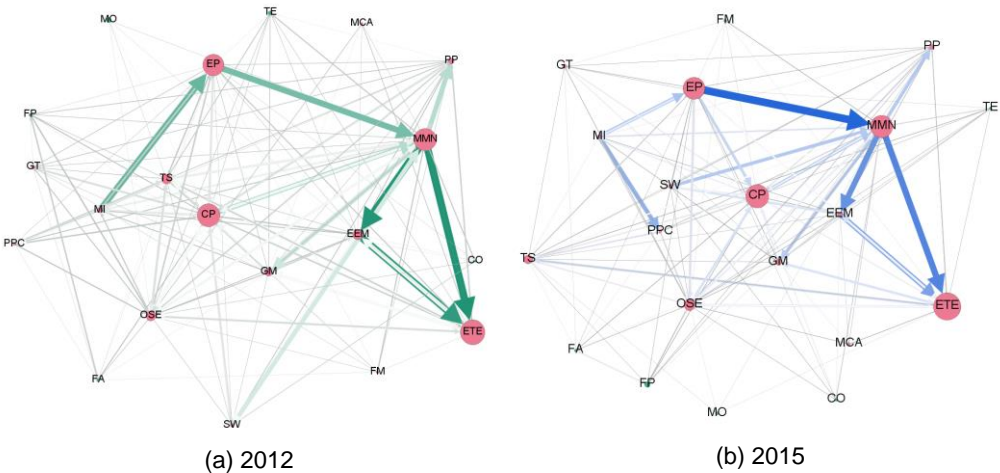


图 4 大气污染代谢网络枢纽传输路径

基于代谢网络中心性分析将所有贸易关系重新链接，则可以标记出 APE 代谢流在系统内部的具体轨迹（详见图 4）。各部门间交易关系的中心性越高，则用以表示的边越宽，颜色越深。同时，一个部门积聚的 APE 代谢量越多，用来表示它的圆圈就越大。比较图 4 显示的所有交易关系，能够发现有一些交易在代谢系统中具有极高度的中心性（例如 $MMN \rightarrow ETE$ 、 $EEM \rightarrow ETE$ 和 $MI \rightarrow PPC$ ），这些贸易关系应该被当地决策者重视并对其优先实施减排管控。值得注意的是，一些部门同时出现在多个具有高度中心性的交易关系中，例如 ETE 出现在 $MMN \rightarrow ETE$ （67.0 Mt）和 $ETE \rightarrow EEM$ （59.4 Mt）中，但其扮演的角色有所不同。ETE 是 MMN 的下游部门，其生产需求导致 MMN 部门向外部环境排放更多的

大气污染物。同时，ETE 是 EEM 的上游产业，EEM 的消费需求间接地促进了 ETE 部门污染的产生与排放。

无论是 2012 年还是 2015 年，MMN 和 EP 作为上游部门都具有高度的代谢网络中心性，这意味着这两个部门倾向于将更多的污染代谢流输出分散到其他部门。另外，虽然与 CP 部门相关的交易关系的中心性均较低，但需要注意的是 CP 部门同时存在于多种供求关系之中，这最终使得该部门积聚与输出的代谢量巨大。相反地，有些部门（如 FA、CO、MO、GT）相关交易的网络中心性较低，通过这些部门间接排放的累计 APE 代谢量较小，说明这些部门倾向于为他们自己的生产排放污染物。根据以上分析，可以从网络系统中摘取一些重要的 APE 代谢路径。MI→EP→MMN→EEM→MMN 和 CP→MMN→ETE→EEM 是两个最重要的代谢路径，它们是整个代谢网络的桥梁。针对这些部门及产业链制定减排管控政策将有效地减轻由整个供应链引起的生态环境压力。

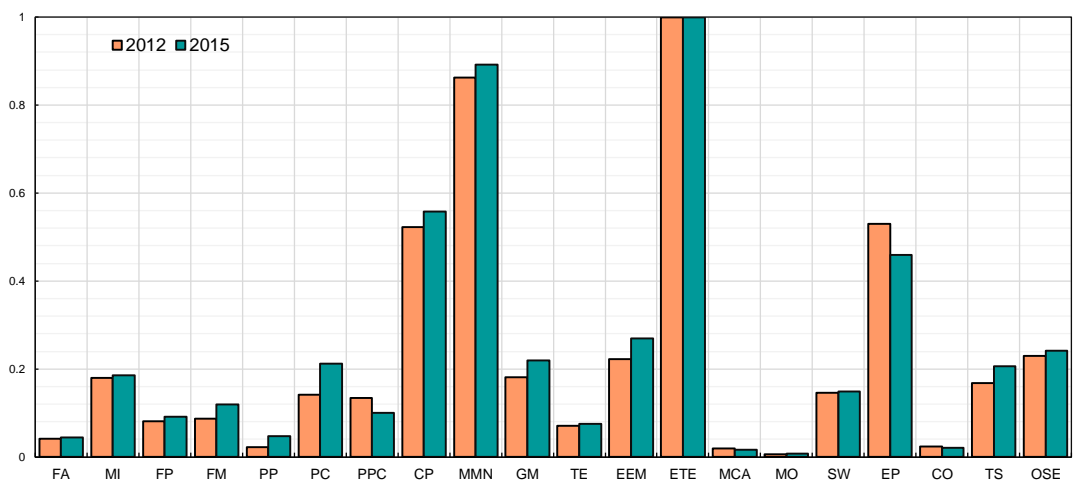


图 5 珠三角城市群各部门中心性指数

计算累积通过的 APE 代谢量量化的每个部门的中心性指数 (EI)。各部门的 EI 计算结果如图 5 所示，图中横坐标表示各部门名称的缩写，纵坐标表示经过标准化处理的 EI 数值。显然，从 2012 年到 2015 年，各部门的 EI 变化不大，但各部门间存在差异。ETE、MMN、CP、EP 的 EI 值均显著高于其他部门。ETE 部门在这两年中都具有最高的 EI 值 (EI=1)，其次是 MMN (2012 年为 0.86，2015

年为 0.89), CP (2012 年为 0.52, 2015 年为 0.55) 以及 EP 部门 (2012 年为 0.53, 2015 年为 0.45)。这四个部门是在珠三角城市群大气污染代谢系统的枢纽并应该被优先实施减排政策。但以往基于产业链上游始端或是下游末端而开展的核算方法不能有效将其识别。

为了深入分析关键枢纽部门的不同大气污染物类型和其能耗结构对系统排放规模的影响, 不仅需要分析主导因子对系统的影响, 而且还需要进一步分析因子间的交互效应。根据上述分析, 针对四个关键部门 (即 CP、MMN、ETE 和 EP) 进行因子设计分析。这四个部门排放的五类大气污染物及与不同能源使用类型 (即表 2 的 21 个因子) 被设计为模拟因子。

表 2 设计因子简称与描述

因子	简称	描述
A	NOx	单位能源量 NOx 排放水平
B	SO ₂	单位能源量 SO ₂ 排放水平
C	CO	单位能源量 CO 排放水平
D	VOCs	单位能源量 VOCs 排放水平
E	PM	单位能源量 PM _{2.5} 排放水平
F	CP_coal	CP 部门煤炭消耗水平
G	CP_coke	CP 部门焦炭消耗水平
H	CP_oil	CP 部门燃油消耗水平
J	CP_gas	CP 部门天然气消耗水平
K	MMN_coal	MMN 部门煤炭消耗水平
L	MMN_coke	MMN 部门焦炭消耗水平
M	MMN_oil	MMN 部门燃油消耗水平
N	MMN_gas	MMN 部门天然气消耗水平
O	ETE_coal	ETE 部门煤炭消耗水平
P	ETE_coke	ETE 部门焦炭消耗水平
Q	ETE_oil	ETE 部门燃油消耗水平

R	ETE_gas	ETE 部门天然气消耗水平
S	EP_coal	EP 部门煤炭消耗水平
T	EP_coke	EP 部门焦炭消耗水平
U	EP_oil	EP 部门燃油消耗水平
V	EP_gas	EP 部门天然气消耗水平

根据效应稀疏原理，一个系统通常由因子的主效应主导，而因子间高阶交互效应则相对影响较小。特别是在需要考虑的因子数量很多的情况下，大量的模拟操作给因子分析的实现带来了巨大的挑战。为了简化计算，引入分式因子设计对多个因子进行检验。因此，本研究采用分辨率为IV的 2^{21-13} 分式因子设计来确定代谢系统中的主要因子。在分辨率为IV的因子设计中，没有任何因子的主效应与其他主效应、两因子交互和高阶交互作用互为别名。因此，该方法可以对各因子对系统的主效应作出明确识别。

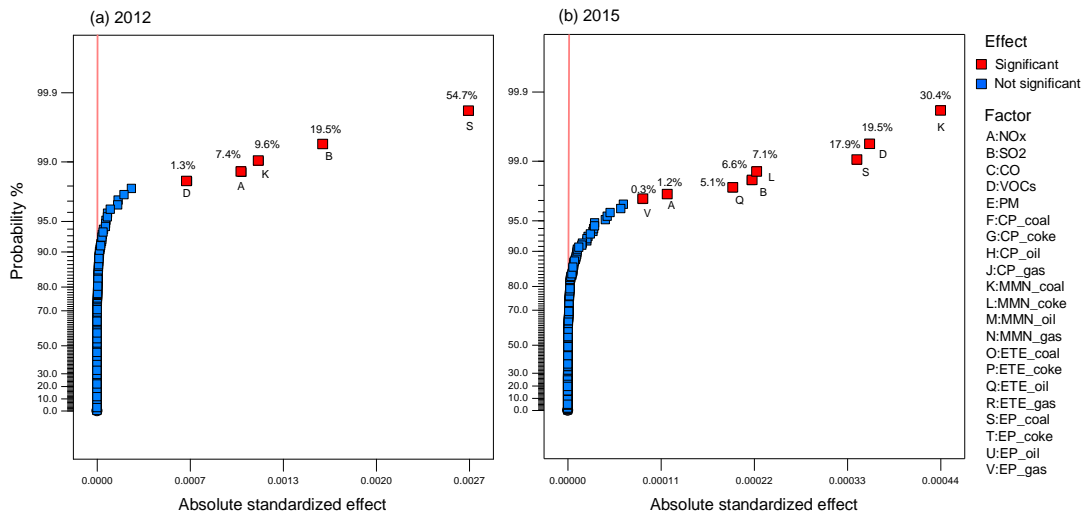


图 6 标准化效应的半正态描点图

通过对累积正态概率的估计，得到了每个效应的绝对值，表示为半正态描点图。正态描点图可在视觉上区分一个效应是否显著。效果越显著，则代表该因子的方块就离红线越远。图中显示（图 6），在 2012 年，显著因子是 S，B，K，A 和 D，而在 2015 年显著因子则是 K，D，S，L，B，Q，A 和 V。各显著因子的

贡献率如图 7 所示。2012 年因子 S 对系统的影响最大，其贡献率达到 54.7%，其次是因子 B 和 K，分别占 19.5%和 9.6%。2015 年各因子对系统的贡献率发生了很大变化，MMN_coal 的贡献率为 30.4%，VOC 的贡献率为 19.5%，EP_coal 的贡献率为 17.9%。与其他能源类型相比，煤炭的使用引起珠三角城市群大气污染物的大量产生。此外，各类大气污染物对珠三角城市群的环境影响与预期不同，PM_{2.5} 作为首要大气污染物已在中国许多地区引起了严重的环境问题，而在珠三角城市群 PM_{2.5} 的问题并不严重。之后，采用全因子设计充分量化这些关键因子之间可能存在的交互效应，其中两因子交互和高阶交互效应的影响都被考虑在内。

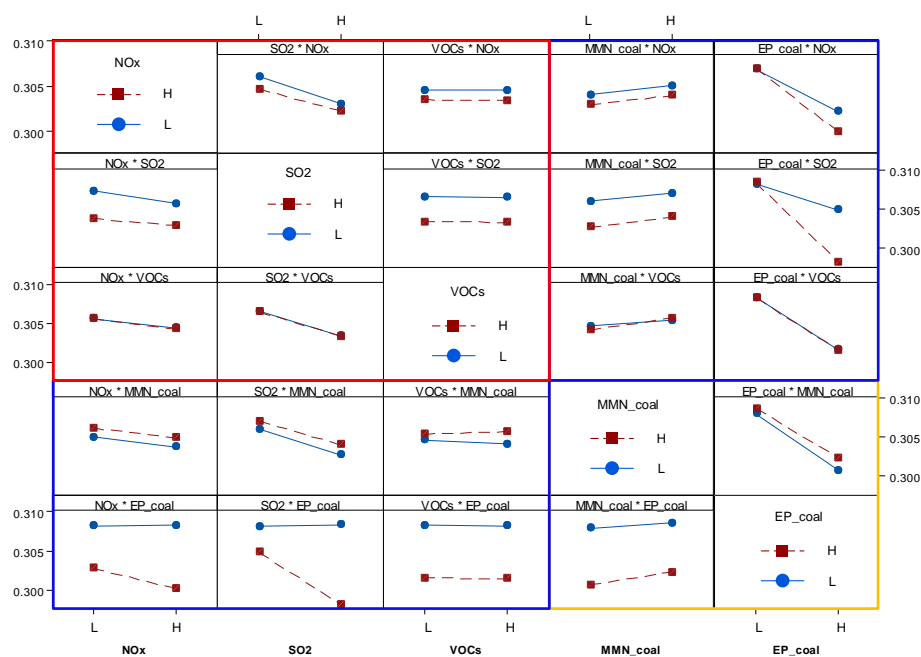


图 7 2012 年代谢系统鲁棒性交互关系矩阵图

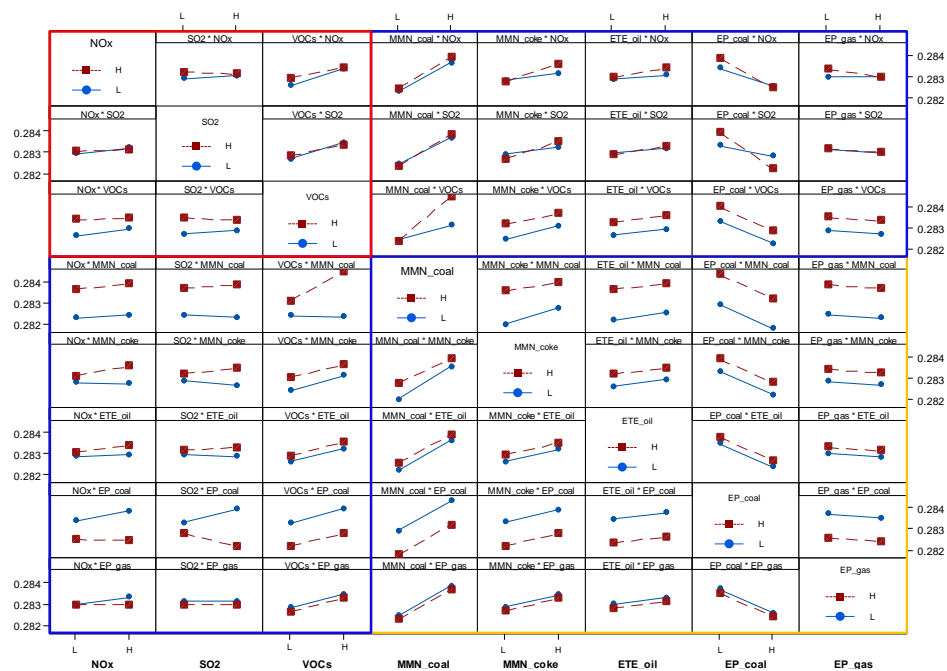


图 8 2015 年代谢系统鲁棒性交互关系矩阵图

图 7 和图 8 显示了关键因子的交互效应。这些矩阵通过描述一个设计因子在另一个设计因子影响下对系统鲁棒性影响的具体变化来描述其间交互效应。另外，图 8 和图 9 被不同颜色的线框分成了三个部分。红色框中的矩阵表示不同类型的大气污染物之间的相互作用。蓝色方框表示大气污染物与能源类型之间的相互作用，黄色线框内的矩阵表示不同能源类型之间的相互作用。以图 7 右上角的 EP_gas 与 NOx 的交互效应图为例，红色虚线表示当 EP_gas 跨两个水平变化时 NOx 的变化。蓝线代表当 NOx 处于低水平时 EP_gas 对系统的影响。当 EP_gas 跨两个级别变化时，红色虚线会下降，而蓝色实线则倾向于水平。这两条线的相交意味着当 NOx 处于不同水平时，EP_gas 的影响效应将改变。这意味着 EP_gas 和 NOx 对代谢系统的鲁棒性具有显著的交互效应。

表 3 各显著因子及其间交互对系统鲁棒性的影响及贡献

2012			2015		
因子	P 值	贡献率 (%)	因子	P 值	贡献率 (%)
A	<0.0001	5.20	A	<0.0001	1.94

B	<0.0001	13.71	B	<0.0001	2.07
D	<0.0001	1.01	D	<0.0001	12.09
K	<0.0001	12.86	K	<0.0001	32.93
S	<0.0001	47.93	L	<0.0001	5.64
交互效应		17.46	Q	<0.0001	1.57
A*B	<0.0001	0.17	S	<0.0001	17.75
A*S	<0.0001	2.37	V	<0.0001	0.63
B*S	<0.0001	14.24	交互效应		24.88
D*K	<0.0001	0.17	A*B	<0.0001	0.31
K*S	<0.0001	0.34	A*D	<0.0001	0.31
2015			A*L	<0.0001	1.25
			A*Q	<0.0001	0.31
B*L	<0.0001	0.94	A*S	<0.0001	1.25
B*Q	<0.0001	0.31	A*V	<0.0001	0.63
B*S	<0.0001	6.96	B*D	<0.0001	0.31
D*K	<0.0001	11.66	B*K	<0.0001	0.31

表 3 分别给出了 2012 年和 2015 年关键因子及其交互效应的 p 值和贡献率的详细结果。2012 年交互效应的贡献率累计达到 17.46%。EP_coal 与 SO₂ 之间的交互作用对系统鲁棒性的影响占总影响的 14.42%，这甚至高于一些因子的主效应。此外，交互效应的贡献率在 2015 年进一步增加到 24.88%。这说明在因子间交互效应不容忽视，应充分挖掘其中隐含的政策含义。2015 年，MMN_coal 产生的 VOCs 排放和 EP_coal 产生的 SO₂ 排放对系统的影响最为显著，它们对系统鲁棒性的影响分别占 11.66%和 6.96%。这意味着对 MMN 部门排放的 VOCs 和 EP 部门排放的 SO₂ 进行控制有助于提高系统效率，此外因子 A 存在于多种交互效应中，2015 年累计达到 4.06%，这表明 NO_x 对系统效率存在影响。

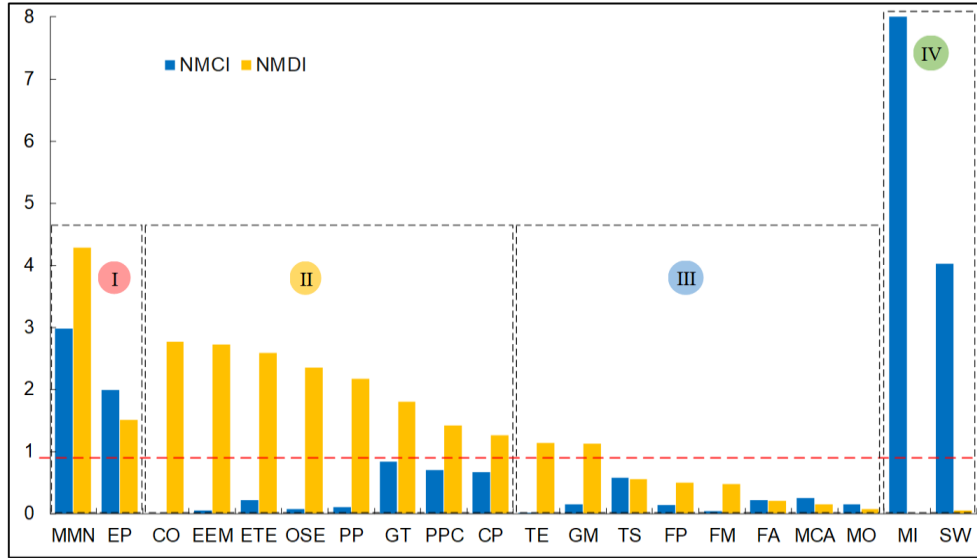


图 9 基于控制指数（NMCI）和依赖指数（NMDI）的部门分类

通过网络控制指数（NMCI）和网络依赖指数（NMDI）对各部门的主导地位进行量化，能够帮助我们进一步了解不同部门在系统中的生态角色。这样才能充分反映各部门的显著差异。图 9 中的红线表示 NMCI 和 NMDI 的平均值。通过将各部门的 NMCI 和 NMDI 与平均值进行比较，将所有部门划分为四个类别。

大多数部门属于第 II 类（弱控制和强依赖）和第 III 类（弱控制和弱依赖），只有少数其他部门属于第 I 类（强控制和强依赖）和第 IV 类（强控制和弱依赖）。MMN 和 EP 被分为第 I 类，说明这两个部门在城市大气污染代谢过程中起主导作用，同时也依赖于其他部门促进其代谢。在第 II 类中，CO 部门的 NMDI 最高（即 2.76）及最低的 NMCI（即 0），说明 CO 部门完全依赖其他部门。MI 和 SW 部门是第四类中仅有的三个部门。根据他们的 NMCI，这些部门是系统代谢过程中最为关键的贡献者。

追踪各部门的演化轨迹是了解区域大气污染物排放变化机制的重要部分。根据 EFL 和 EBL 的结果，将所有部门分为四类。EFL 代表了区域排放系统中一个部门的拉动力，用来衡量该部门的初始投入对产业链中 APE 排放的影响。EBL 则代表了一个部门的驱动力，它将一个部门的需求比作驱动力，量化了该部门对上游部门产生的大气污染排放的影响。如图 10 所示，不同的部门在珠三角城市群大气污染排放系统中扮演着不同的角色。图 10（a）第二象限内的部门可以定

义为供应侧的关键部门。**MI** 和 **PPC** 部门的初始投入的促进作用在产业链中传导，最终导致系统排放规模的扩大。

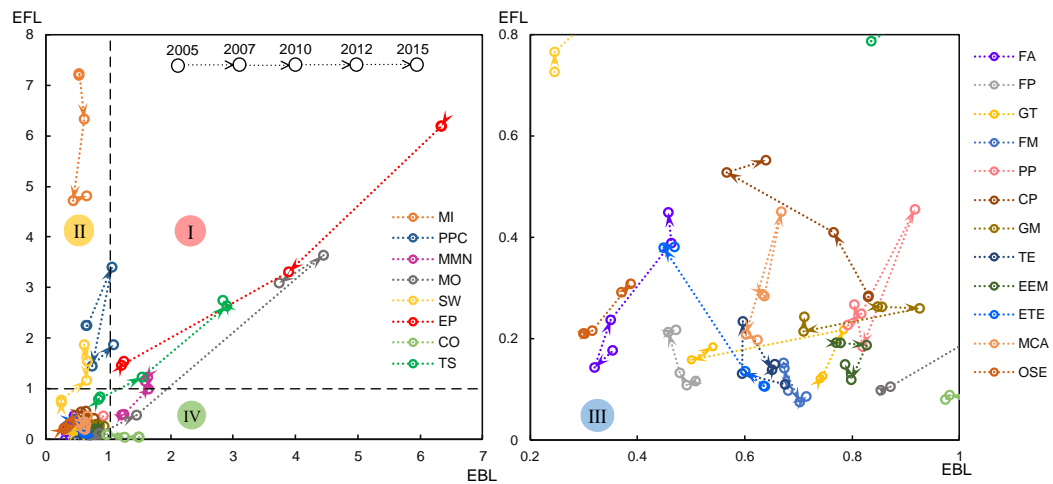


图 10 珠三角各部门演化轨迹

相反地，第四象限内的部门（例如 **CO**）需要被视为消费侧的关键部门，其需求驱动了大量上游排放。调节这些部门的需求结构是制定减排战略的关键。此外，还有一些同时具有高 **EFL** 和高 **EBL** 的部门（例如 **EP**）位于第一象限中，这表明这些部门需要被实施基于供需双方的综合减排措施。与此同时，一些部门在排放系统中的作用也随着时间发生了变化。以 **MMN** 为例，它在早期以低 **EFL** 和高 **EBL** 在排放系统中扮演最终消费者的角色。然而，在 2012 年至 2015 年期间，随着拉力逐渐增加，**MMN** 成为区域排放系统的主导者之一。这表明供需格局的变化将影响部门排放表现。结合 **EFL** 和 **EBL** 分析的结果来确定关键部门，可以帮助决策者更全面地确定每个部门的角色，这是将减排责任分配给每个部门的前提。

根据网络控制分析的结果，将所有部门重新分为四类。从生产的角度来看，第 I 类和第 IV 类的部门对代谢系统的控制最强，这意味着这些部门对其他部门的污染出口是巨大的。因此，这些部门被视为关键对象。另一方面，第 II 类部门对整个系统的依赖程度最高，这说明中间消费主要来自第 II 类部门。

表 4 减排模拟情景设置		
减排策略	干扰情景	情景设置
基于生产视角的减排策略	S1	减少 I 类部门（如 MMN 和 EP）10%的污染物直接排放量，并相应地改变代谢网络中的流量分布
	S2	减少 II 类部门（如 ETE 和 OSE）10%的污染物直接排放量，并相应地改变代谢网络中的流量分布
	S3	减少 III 类部门（如 TS 和 FM）10%的污染物直接排放量，并相应地改变代谢网络中的流量分布
	S4	减少 IV 类部门（如 MI 和 SW）10%的污染物直接排放量，并相应地改变代谢网络中的流量分布
基于消费视角的减排策略	S5	削减流入 I 类部门的污染代谢流量 10%
	S6	削减流入 II 类部门的污染代谢流量 10%
	S7	削减流入 III 类部门的污染代谢流量 10%
	S8	削减流入 IV 类部门的污染代谢流量 10%

从生产和消费的角度，分别采用 PSS 和 CSS 对四类部门进行政策干扰。情景设置如表 4 所示。不同模拟场景下各部门的代谢量变化如图 11 不同模拟情景下各部门的减排效果所示。结果表明，不同情景下的减排效果的变化呈现明显的规律性。所采用的干扰政策类型及其所干扰的部门类别对减排效果都有决定性的影响。

将对不同类型部门的外部污染代谢流进口量减少 10%，减排效果各不相同。在 S1 干扰下，类别 I 中的部门对 PSS 的响应最强。在 S1 干扰下，EP 和 MMN 的间接排放分别降低了 9.92%和 9.42%。此外，其他部门的排放量也大大减少，所有部门的间接排放总量减少了 8.70%，这表明减少对第一类部门的外部进口有利于整个系统的缓解。但是，某些干扰策略对特定扇区有效，但对系统范围内的减少却无用。例如，在 S3 干扰下，减少对 III 类行业的外部进口可有效减少其排放，但对其他行业的减排效果一般。例如，MO 的间接排放减少了 6.28%，而所有部门的总间接排放仅减少了 0.83%。同样地，在 S2 和 S4 中，将划分为 II 类

和 IV 类的行业中外部进口的污染代谢流减少,对系统整体的减排效果帮助甚微,排放仅减少了不到 0.40%。结果表明,只有针对具有高度控制和高度依赖的部门实施基于生产的减排措施才能在系统整体层面取得良好的减排成效。

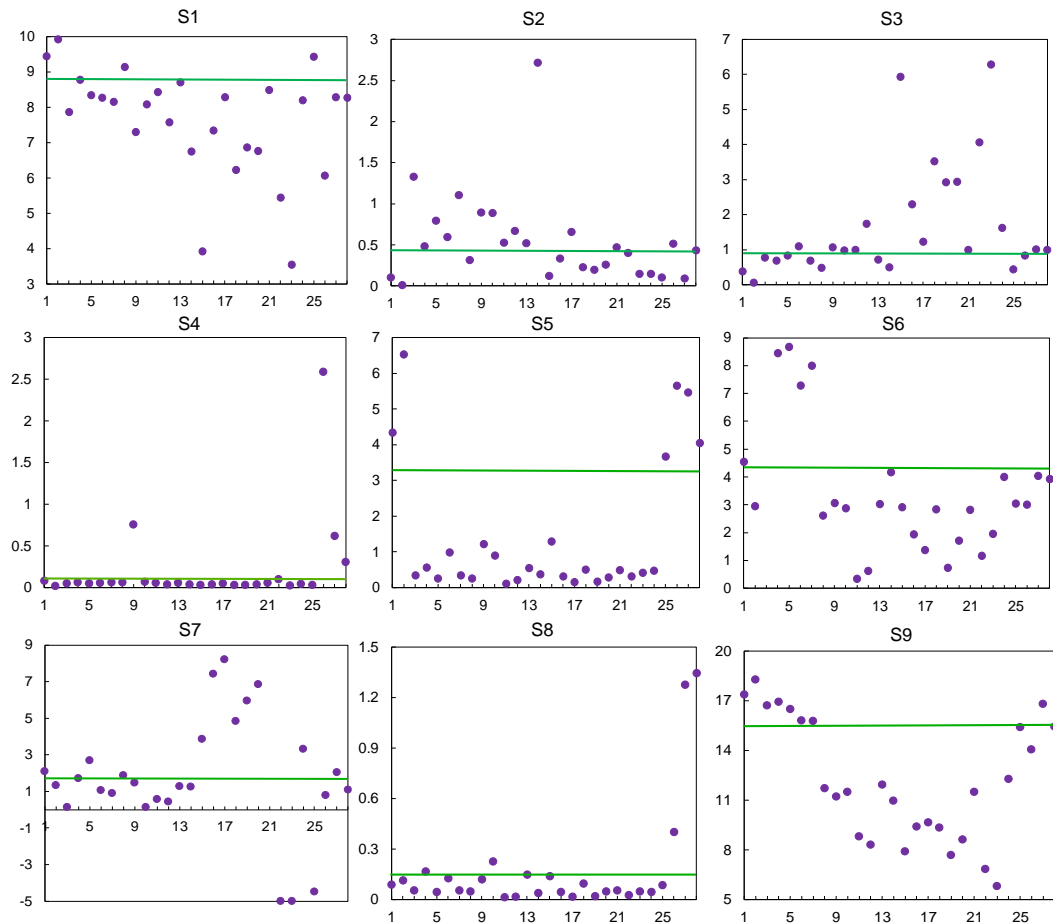


图 11 不同模拟情景下各部门的减排效果

在消费方面, CSS 将四个部门类别的总代谢流入量进行削减。四种情景模拟结果之间存在显著差异。在 S5 至 S8, 各部门的代谢入流量减少 10.00%后, 其间接排放也相应减少。特别是在 S6 中, 不仅第 II 类部门减排效果显著, 其他部门也有较大的减排效果, 促进系统的间接排放减少 4.26%。显然, 对第 II 类部门实施基于消费的减排策略最为有效。此外, 第 I 类部门对 S5 干预也有积极响应。S5 中设置的政策干扰不仅使 MMN 和 EP 的排放量分别减少了 4.33%和 6.52%, 而且使 IV 类部门的排放量有了明显的减少。此外, S8 中各部门的减排效果不佳, 大部分行业的减排幅度不到 1.00%, 说明从消费角度对第 4 类行业进行调控是整

体减排效果最不理想的方式。在情景 9 中，第一类行业的污染进口减少了 10%。与此同时，第二类行业的总流入量下降了 10%。整个系统的间接排放显著降低 15.43%，各部门减排均大于 5.80%，优于其他干扰的减排。这一结果表明，从生产和消费角度制定的综合减排策略可以获得较好的减排效果。

综上所述，研究基于系统角度构建珠三角地区城市综合大气污染物代谢模型，诊断生态系统健康状况，并分析多维度因子交互效应，揭示多种大气污染物的协同代谢机制。首先，珠三角城市群大气污染物代谢系统由于其复杂的结构而各种大气污染物对城市生态健康系统的影响与预期不同，无论是部门类别还是其能源消耗结构都是具有决定性影响。金属和非金属矿物产品制造业，电力供应业（EP），电子和电信设备制造业和化学产品制造业是代谢网络的关键枢纽。其次，从供需需求两个角度全面系统地揭示社会经济因素对区域环境变化存在潜在影响，供需模式的变化会导致广东省大气污染物排放波动。最终需求水平是引起排放增加的最大驱动者，而排放强度是抵消增长的最关键因素。需求和供应结构也存在显著差异，初始投入结构对减排的贡献大于最终需求结构。最后，通过量化各部门之间生态交互关系，进行部门再分类。并根据结果针对不同部门类别实施减排模拟：对电力供应业和金属与非金属制造业实施基于生产的管控政策，而对建筑业和社会服务业实施实施基于消费的调控政策。

参考文献

- [1] Barcelo D, Bennett J P. Human health and environmental risks of unconventional shale gas hydrofracking[J]. Science of the Total Environment, 2016,544:1139-1140.
- [2] Jing Y, Bing Z. Air pollution and healthcare expenditure: Implication for the benefit of air pollution control in China[J]. Environment International, 2018,120(NOV.):443-455.
- [3] Zhong Z, Zheng J, Zhu M, et al. Recent developments of anthropogenic air pollutant emission inventories in Guangdong province, China[J]. Science of The Total Environment, 2018,627(JUN.15):1080-1092.
- [4] B M H A, B J Z A, B S Y A, et al. Trends, temporal and spatial characteristics, and uncertainties in biomass burning emissions in the Pearl River Delta, China[J]. Atmospheric Environment, 2011,45(24):4051-4059.
- [5] Qiang Z, Jiang X, Dan T, et al. Transboundary health impacts of transported global air pollution and international trade[J]. Nature.
- [6] Yz A, Yc B, Xue Q, et al. Air pollution reduction in China: Recent success but great challenge for the future[J]. Science of The Total Environment, 2019,663:329-337.
- [7] PM. HONG KONG ENVIRONMENTAL PROTECTION DEPARTMENT[J].

-
- [8] Zheng J, Che W, Wang Z. Traffic flow and road network-based spatial allocation of regional mobile source emission inventories[J]. *Huanjing Kexue Xuebao / Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009,29(4):815-821.
- [9] Zheng J, Che W, Wang X, et al. Road-network-Based spatial allocation of on-road mobile source emissions in the Pearl River Delta region, China, and comparisons with population-based approach.[J]. *J Air Waste Manag Assoc*, 2009,59(12):1405-1416.
- [10] 卞雅慧, 范小莉, 李成, 等. 广东省非道路移动机械排放清单及不确定性研究[J]. *环境科学学报*, 2018,038(006):2167-2178.
- [11] 潘月云, 李楠, 郑君瑜, 等. 广东省人为源大气污染物排放清单及特征研究[J].