
聚合层面与分散层面的工业固废动态代谢特征分析

经济的快速发展和工业化进程的加快导致大量工业固废的产生与堆积。其污染防治成为社会可持续发展的难题，也是维持城市生态系统健康的重要环节。工业固废的污染不仅对周围环境有着巨大危害，更严重影响着水体、土壤及大气生态系统^[1]。首先，当工业固废排放到周围环境中：排入河流湖泊中的工业废渣堵塞河道、危害水利工程；有害化学药品等污染水体，破坏水生生物的生长环境；重金属等有毒污染物被水生动植物吸收后，通过食物链累积，或将危害人体健康^[2]。其次，工业固废的长期堆放占用大量土地，其有害成分经过长期的风吹日晒容易污染土壤，危害土壤中的微生物，破坏土壤生态系统结构。同时重金属等有毒有害物质在土壤中日益聚集，可能会被植物吸收，导致人类食用后危害人体健康、引发疾病^[3]。最后，粉状的工业固废在堆放过程中容易随风飞扬至空气中，造成大气污染，影响空气质量^[4]。此外，有的污染物在堆放过程中还会散发有毒气体和具有刺激性气味的气体，直接对动植物生长及人类身体健康造成伤害^[5]。因此有必要对城市固废的污染防治进行讨论，寻求更加高效的减排途径，从而统筹协调大气、水、土壤、固废生态系统的健康保护机制。

在 2021 年 3 月印发的《广东省推进“无废城市”建设试点工作方案》中，珠三角所有城市被列入“无废城市”试点^[6]。这意味着在珠三角各城市推行绿色工业、绿色生活、绿色农业，培育固体废物处置产业，推行固体废物多元共治将成为近年来该区域的主要任务^[7]。然而，近年来随着珠三角地区人口密度的增加和经济的快速发展，密集的工业活动导致了大量工业固废的产生^[8]。加之该区域轻、重工业发展不均衡的工业运行特点，2015 年珠三角工业固体废弃物产生量占比高达广东省的 40.4%^[9]。因此，面对艰巨的减排目标和沉重的减排压力，有必要针对珠三角地区固废代谢系统的生产和各部门的生产关系展开深入讨论，以实现工业固废的源头大幅减量、充分资源化利用和安全处置。

因此，本研究针对工业固废，分别进行聚合层面的指数分解分析和分散层面的投入产出分析，以探寻造成不同类型固废产生的社会经济因素，为未来的固废减排政策的制定提供科学依据。首先，从聚合部门的层面，选取可能会影响珠三角工业固废排放量的潜在社会经济因子，而后通过对数平均迪氏指数分解法识别

出主要的影响因子。接着，在分散部门的层面，根据珠三角的社会经济系统基本特征，将国民经济部门进行分类，并按照分类结果整合货币投入产出表。而后，利用 MATLAB 软件，建立分散的部门水平的环境拓展投入产出模型，建立珠三角的工业固废代谢系统，并对其动态代谢特征做出深入的分析，包括基于“体现强度和使能强度”的联动分析和基于三视角核算的环境责任分析。

具体地，本研究首先从聚合部门层面出发，从宏观角度采用指数分解分析法识别影响工业固废排放量变化的社会经济因素，引入对数平均迪氏指数分解法来识别主要的影响因子。以往的研究表明，某地区的工业固废的产生量与该地区的废物产生强度、产业结构、经济发展和人口因素密切相关。因此，本研究定义这四种因子为潜在因素。

常见的对数平均迪氏指数分解法的分解模式有乘法和加法两种。这两种方法的分解结果意义相同，只有表现形式的差异。与加法形式的结果相比，乘法形式的分解结果以大于或者小于 1 的形式表示，分解结果的数据跨度更小，能够更加清晰地体现各种社会经济因子的相对贡献程度。因此，本研究采用乘法形式，某年的工业固废总产量可以分解为以下形式，

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{W_i}{X_i} \cdot \frac{X_i}{X} \cdot \frac{X}{P} \cdot P = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^d \cdot S_i \cdot Q \cdot P$$

式中， n 代表该工业固废代谢系统中的产业个数（个）； W 为工业固废排放总量（Mt）； W_i 为 i 产业的工业固废排放量（Mt）； X 代表总产出（万元）； X_i 代表 i 产业的总产出（万元）； P 为人口规模（万人）； ε_i^d 为产生强度因子，即 i 产业的单位总产出的工业固废排放量（Mt/万元）； S_i 为产业结构因子，即 i 产业的经济总产出对于系统总产出的相对贡献率^[52]； Q 为经济发展因子，即人均总产出（元/人）。

据此， T 年与基准年的工业固废排放量的相对变化以及各种社会经济因子对于总排放量变化的相对贡献可用以下公式表示，

$$\Delta W = W^T / W^0 = \Delta W_{int} \cdot \Delta W_{str} \cdot \Delta W_{eco} \cdot \Delta W_{pop}$$

$$\Delta W_{int} = \exp \left(\sum_{i=1}^n \frac{L(W_i^T, W_i^0)}{L(W^T, W^0)} \cdot \ln \left(\frac{(\mathcal{E}_i^d)^T}{(\mathcal{E}_i^d)^0} \right) \right)$$

$$\Delta W_{str} = \exp \left(\sum_{i=1}^n \frac{L(W_i^T, W_i^0)}{L(W^T, W^0)} \cdot \ln \left(\frac{S_i^T}{S_i^0} \right) \right)$$

$$\Delta W_{eco} = \exp \left(\sum_{i=1}^n \frac{L(W_i^T, W_i^0)}{L(W^T, W^0)} \cdot \ln \left(\frac{Q_i^T}{Q_i^0} \right) \right)$$

$$\Delta W_{pop} = \exp \left(\sum_{i=1}^n \frac{L(W_i^T, W_i^0)}{L(W^T, W^0)} \cdot \ln \left(\frac{P_i^T}{P_i^0} \right) \right)$$

式中， W^0 为基准年的工业固废排放量（Mt）； W^T 为 T 年的工业固废排放量（Mt）； ΔW 为 T 年与基准年的工业固废排放量相对变化； ΔW_{int} 为产生强度效应对于工业固废排放量变化的相对贡献； ΔW_{str} 为产业结构效应对于工业固废排放量变化的相对贡献； ΔW_{eco} 为经济发展效应对于工业固废排放量变化的相对贡献； ΔW_{pop} 为人口效应对于工业固废排放量变化的相对贡献； $L(x, y)$ 为对数平均函数。

在乘法分解形式下，若某种效应的相对贡献值大于 1，表示该效应对工业固废的总产生量的变化有促进作用；反之，若某种效应的分解结果小于 1，表示该效应对工业固废的总产生量变化有抑制作用。据此所得的动态分析结果可以评估不同效应对整个系统代谢的促进或抑制作用，从而对工业固废减量政策的制定提供宏观的科学依据。

在该工业固废代谢模型中，系统中某个产业产生的工业固废对其他产业有两种联动效应。一方面， i 产业的工业固废的产生量的增加意味着沿着供应链，该产业（作为工业固废的产生者）增加了对其下游产业的工业固废密集型产品的投入，这种 i 产业与其下游产业之间的联动关系用“前向联系（Forward linkage）”描述。另一方面， i 产业的工业固废排放量的增加也表明它（作为消费者）对其上游部门的产品需求增加了，这种 i 产业与其上游产业之间的联动关系用“后向联系（Backward linkage）”来定义。具体而言：

$$BL_i = \frac{\varepsilon_i}{\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \varepsilon_i \right)}$$

$$FL_i = \frac{\theta_i}{\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \theta_i \right)}$$

式中， BL_i 为 i 产业的后向联系； FL_i 为 i 产业的前向联系。

联动分析可以用来判断各个产业对系统的综合依赖程度。根据 BL_i 和 FL_i 是否大于 1，可以将代谢系统的各个产业（或部门）按照如所示表 1 的四分法进行分类。

表 1 前向联系和后向联系的分类

		后向联系	
		低（小于 1）	高（大于 1）
前向联系	高（大于 1）	（II）依赖于产业间的需求	（I）重点部门或产业
	低（小于 1）	（III）相对独立	（IV）依赖于产业间的供应

如果 $BL_i > 1$ ，增加 i 产业（或部门）的需求将导致整个系统产生更多的工业固废；如果 $FL_i > 1$ ，增加 i 产业的初始投入将导致整个系统的工业固废的产生量增加。如果 $FL_i > 1$ 且 $BL_i > 1$ ， i 产业（或部门）位于区域 I，我们定义它为重点产业（或部门）；如果 $FL_i > 1$ 且 $BL_i < 1$ ， i 产业（或部门）位于区域 II，代表 i 依赖于系统的产业间需求；如果 $FL_i < 1$ 且 $BL_i < 1$ ， i 产业（或部门）位于区域 III，代表与其他产业（或部门）相对独立，也就是联动不紧密；如果 $FL_i < 1$ 且 $BL_i > 1$ ， i 产业（或部门）位于区域 IV，代表 i 依赖于产业间的供应。

此外，本研究应用基于生产、投入和消费的三视角的生态要素代谢核算，进行环境责任分析。具体而言， i 产业的基于生产的工业固废的核算指的是其工业固废的直接产生量 $W_i=\varepsilon_i^d \cdot X_i$ 。 i 产业的基于投入的工业固废的核算指的是由于 i 产业的初始投入造成其下游产业的工业固废排放。 i 产业的基于消费的工业固废的产核算指的是由于 i 产业的最终需求造成的其上游产业的工业固废排放。

$$\mathbf{s} = \mathbf{V}\boldsymbol{\theta}$$

$$\mathbf{c} = \boldsymbol{\varepsilon}\mathbf{F}$$

式中， \mathbf{s} 为基于投入的工业固废核算向量； \mathbf{c} 为基于消费的工业固废核算向量； \mathbf{V} 为初始投入向量 \mathbf{V} 构成的对角矩阵； \mathbf{F} 为最终需求向量 \mathbf{F} 构成的对角矩阵。

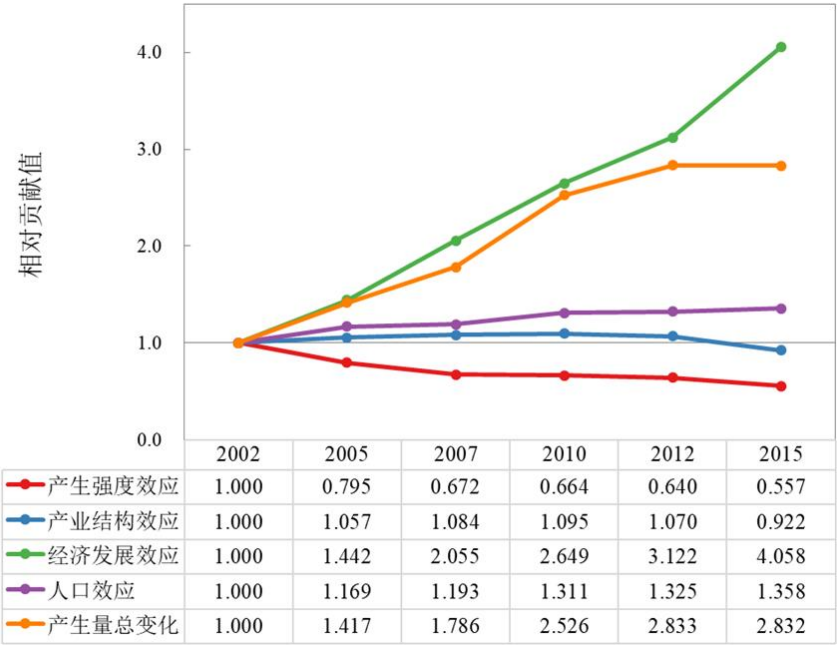


图 1 2002-2015 年珠三角工业固废排放量的变化的对数平均迪氏指数分布
（注：若效应值大于 1，表示因子对工业固废排放量变化起促进作用；反之，起抑制作用）

总体来看，珠三角工业固废的产生量变化效应从 2002 年的基准值 1.000 持续增加到了峰值年 2012 年的 2.832，且在 2002-2010 年间增长速度迅猛，在 2010-

2012 年间增速有所下降，并于 2012 年后呈现轻微下降态势，减小到了 2.832（详见图 1）。研究表明，进一步识别影响工业固废排放增长的重点社会经济因子，并提出工业固废减量措施是很有必要的。

具体地，在 2002-2012 年间，经济发展效应的分解值从 2002 年的基准值 1.000 持续增加到了 2012 年的 3.122，且在每年的四种因子的分解结果中都呈现出最大的相对贡献，这说明经济发展效应是促进该时间段内工业固废排放量增加的最大驱动因素，且其驱动作用的相对贡献值在逐年增加。2012 年至 2015 年间，尽管工业固废排放量有轻微下降的趋势，经济发展效应对工业固废排放的促进作用愈加强烈，反映出它在珠三角工业固废排放的活动中不可忽视的影响。同时，人口效应贡献值的分解结果从 2002 年的基准值 1.000 逐步平缓增长到了 2015 年的 1.358。其主要原因是 2002-2015 年间，珠三角的年人口规模从 0.7859 亿增加到 1.0849 亿。人是社会经济系统的核心，人口的迅速增长意味着社会经济市场对工业产品需求的急速增加。因此，人口效应成为了促进工业固废排放量增加的重要因子之一。

另一方面，工业固废产生强度效应的分解值逐年降低，从基准年的 1.000 下降到了 2015 年的 0.557，说明它是珠三角工业固废排放量变化的持续性抵消因子。因此，探索珠三角工业固废代谢系统的内部特征，明确不同社会经济部门的工业固废的产生强度差异，识别出工业固废排放量大且产生强度高的产业，从而因地制宜地制定出针对不同产业的个性化减排方案，将有利于工业固废减量工作的落实。此外，产业结构效应的贡献值在 2002 至 2012 年之间的分解值均大于 1.000，并保持相对平稳，意味着它对珠三角工业固废的增加起到促进作用。在 2010-2015 年间，产业结构效应的分解结果取值有缓慢下降的趋势，也就是说其驱动程度在逐渐减弱，并且从相对贡献值 1.095 的促进因子逐渐跌落为 2015 年的相对贡献值为 0.922 的抵消因子。随着工业化进程的推进，珠三角的工业经济总产值不断增长，产业结构逐步调整优化，这使得珠三角的产业结构效应对工业固废的排放量增加的促进效应越来越小，直到 2015 年转换为了一个抵消工业固废的产生量增长的因子。因此，未来珠三角可以通过进一步调整和优化产业结构，从而使产业结构效应的相对贡献值逐步走低，更大程度的为工业固废的减量化服

务。

本研究还从分散角度出发，着眼于各种经济部门和产业的工业固废代谢动态特征分析，基于珠三角统计局发布的 2002、2005、2007、2010、2012 和 2015 年的货币流投入产出表、国家统计局发布的历年《环境统计年鉴》和各类相关统计数据，建立基于环境拓展投入产出框架的珠三角工业固废代谢的综合评估模型，详细剖析珠三角的工业固废代谢动态特征，从而解答以上问题。

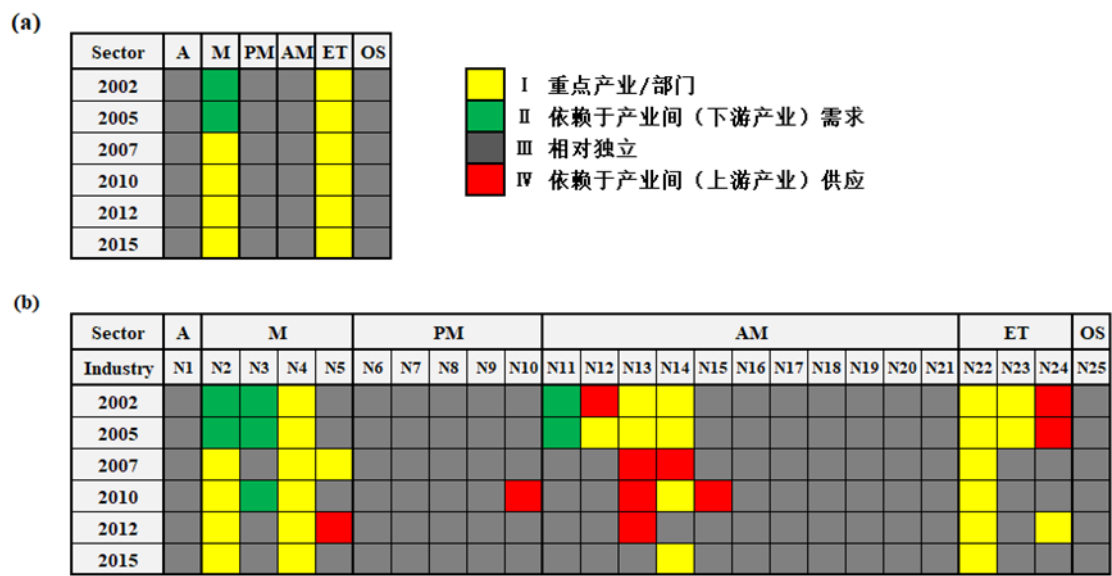


图 2 2002-2015 年部门和产业关联分析性分类结果

图 2 显示了 2002-2015 年各部门及行业在珠三角工业固废代谢系统中的联动分析的四分法结果。对于 6 个部门而言，在研究期间，农业部门（A）、初级制造业部门（PM）和其他服务业部门（OS）始终位于 III 区域，也就是与系统相对独立。由于能源与材料转化部门（ET）的前向联系和后向联系均大于 1，因此每一年能源与材料转化部门（ET）均是高度依赖于此固废代谢系统，是固废减排需要重点关注的部门。这意味着，一方面，能源与材料转化部门（ET）产品供应的增加可以为其下游部门提供更多的（与其他部门相比）工业固废密集型产品；另一方面，能源与材料转化部门（ET）产品需求的增长或将迫使其上游部门投入更多的（与其他部门相比）工业固废密集型产品。而这两者均将导致整个代谢系统排放更多的工业固废。图 2（a）中，自 2007 年以来，采矿业部门（M）在此代谢

系统中一直扮演着重点部门的角色,但是由于它的前向联系大于1但后向联系小于1,表明其始终更加依赖于产业间的需求。这意味着采矿业部门(M)的后向联系的不断增加导致它不仅要向其下游部门提供工业固废密集型产品,而且还在自身生产活动中产生大量工业固废。

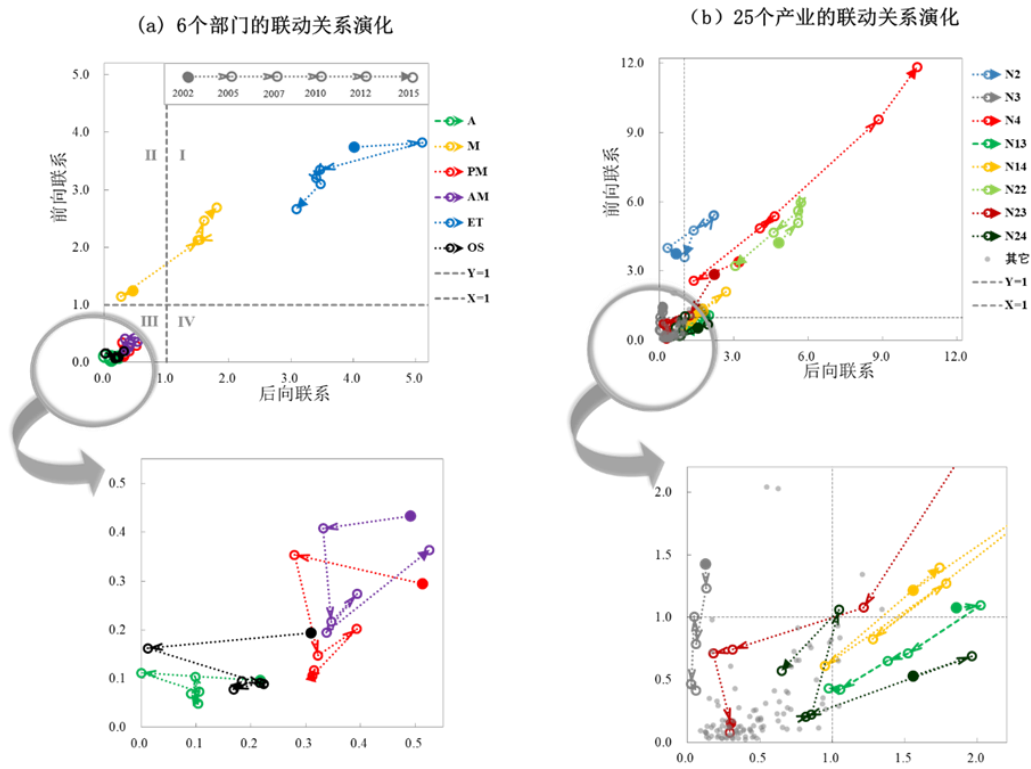


图 3 2002-2015 年珠三角部门和产业的联动关系演化

如果只是探索 6 个部门对珠三角工业固废代谢系统的依赖性是比较片面的,因此,图 2 (b) 进一步将分类结果拓展至 25 个产业。同时,图 3 展示了 2002 至 2015 年各部门和产业的联动关系演化过程。

能源与材料转化部门(ET)一直是位于I区域的重点部门,其主要是因为电力、热力生产和供应产业(N22)、燃气生产和供应产业(N23)和水生产和供应产业(N24)在研究期间一直都扮演重点产业角色。其中,如图 3 (b) 所示,热力生产和供应产业(N22)始终位于I区域,且其后向联系和前向联系的数值均先逐渐增大,却在 2007 年以后逐渐降低。燃气生产和供应产业(N23)对系统的依赖性逐年减弱,从而导致其从I区域的重点产业向相对独立于系统的III区域转变。对于采矿业部门(M),其联动关系的演化主要是由煤炭采选产品产业(N2)、石

油和天然气开采产品产业（N3）和金属矿采选产业（N4）引起的。具体而言，自 2007 年开始，煤炭采选产品产业（N2）一直是珠三角工业固废代谢系统中的重点产业，而在此之前，它更多地依赖于其下游产业的需求，因此在四向分类结果中位于Ⅱ区域。此外，从图 3（b）可以看出，石油和天然气开采产品产业（N3）的前向联系线性下降，这表明该产业向其下游产业供应工业固废密集型中间产品的量逐年减少。值得注意的是，自 2005 年以来，金属矿采选产业（N4）的后向联系和前向联系迅速增加并最终达到峰值。这一结果揭示了金属矿采选业在珠三角工业固废代谢系统中的重要性。换言之，金属矿采选业（N4）对系统的依赖性日益增加，这是未来工业固废减量政策制定的突破点。此外，尽管先进制造业部门（AM）相对独立于系统，但一些产业的联动关系在研究珠三角的工业固废代谢时也是不可忽视的，如化学工业（N12）、非金属矿物制品业（N13）和金属冶炼及压延加工业（N14）。例如，在 2002-2015 年期间，非金属矿物制品业（N13）和金属冶炼及压延加工业（N14）在Ⅰ区和Ⅳ区之间波动，这意味着它们的上游产业通过供应链将工业固废密集型商品转移给了它们。

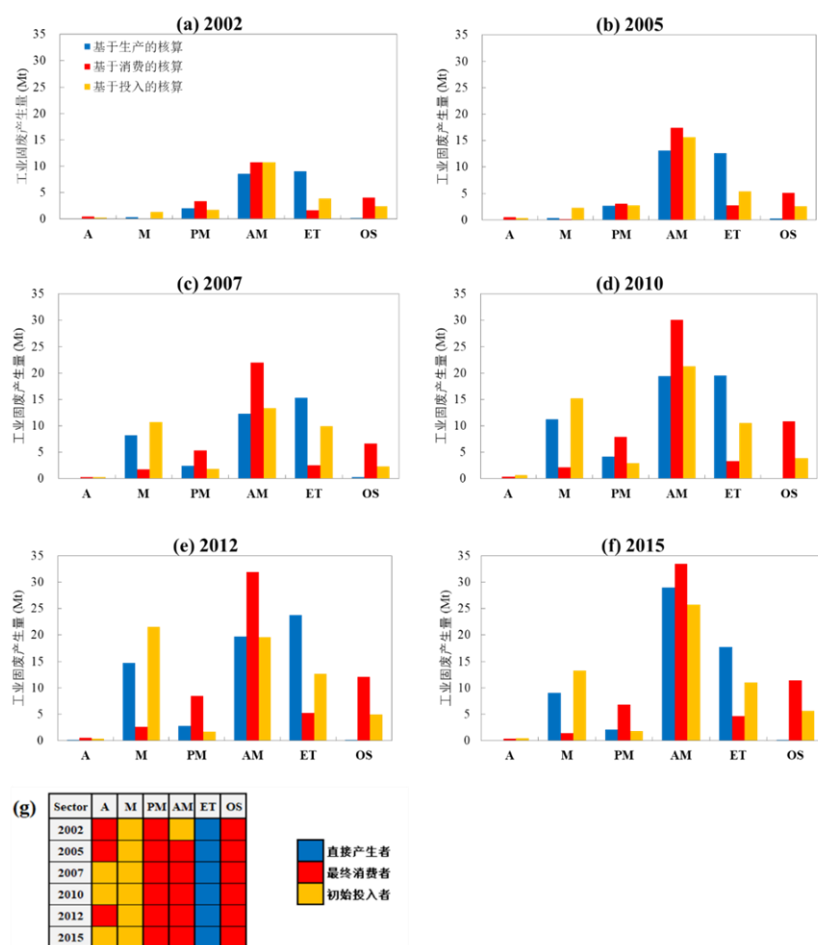


图 4 (a) - (f) 2002-2015 年各部门基于生产、基于消费和基于投入的工业固废排放核算及 (g) 部门环境责任判定

图 4 显示了 2002、2005、2007、2010、2012 和 2015 年珠三角 6 大部门的三视角工业固废排放核算结果和环境责任评估结果。对于采矿业部门 (M) 而言, 每年它基于投入的工业固废排放要高于其基于生产和基于消费的排放。例如, 2015 年采矿业部门基于投入的工业固废排放量 (13.23 Mt) 比其基于生产 (9.06 Mt) 高了 45.95%, 同时比其基于消费的固废排放量 (1.40 Mt) 高了 847.17%。这一结果表明, 采矿业部门 (M) 是珠三角工业固废代谢系统的初始投入者。能源和材料转化部门 (ET) 是此代谢系统中最大的工业固废的直接产生者, 因为在 2002-2015 年期间, 其基于生产的工业固废排放量比其基于投入的固废排放量高了 54.83%-134.64%, 也比其基于消费的固废排放量高 350.81%-507.65%。此外, 初级制造业部门 (PM) 和先进制造业部门 (AM) 每年基于消费的固废排放量更高, 这表明它们的环境责任应由最终消费者承担。在此代谢体系中, 处于最高层

级的其他服务业部门（OS）通常有很高的消费需求，因而导致了大量工业固废的排放。这个结果意味着其他服务业部门（OS）作为最终消费者比作为直接生产者和主要供应者更为重要。

此外，图 4 展示了 2002-2015 年间 6 个行业的环境责任的演化情况。为了进一步详细说明各个经济部门的演化过程，图 5 将工业固废的排放进一步细分到了 25 个行业水平。

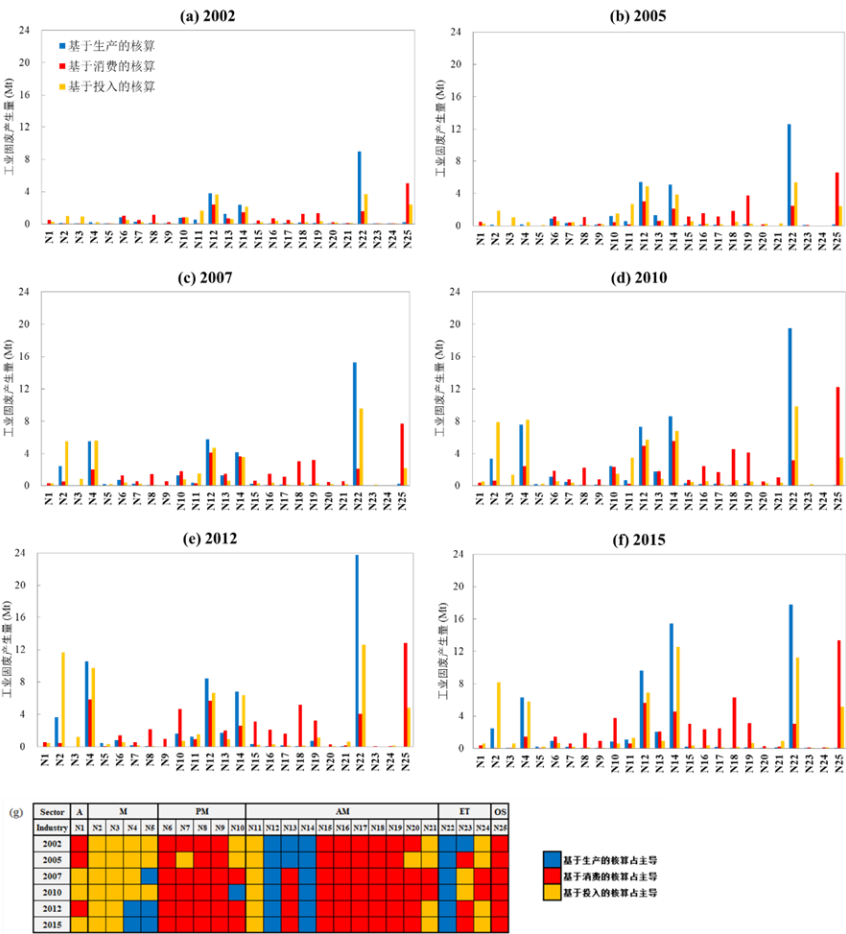


图 5 （a） - （f） 各产业基于产生、消费和投入的 ISW 产生量； (g) 各产业环境责任评估

对于采矿业而言，在 2002 至 2015 年间，其基于投入的工业固废排放核算量从 1.40 Mt 增加到了 13.23 Mt。值得注意的是，从 2005 到 2007 年，因为采矿业部门（M）的初始供应导致整个系统的工业固废排放增加了 379.55%，而从 2012 到 2015 年，它导致的工业固废排放减少了 38.71%。这些变化主要是由煤炭采选

产品产业（N2）和金属矿采选产业（N4）的演化引起的。对煤炭采选产品产业（N2）而言，其基于投入的核算占据了主导地位，且 2005 年至 2007 年间增长了 189.26%，2012 年至 2015 年下降了 29.98%。对金属矿采选产业（N4）而言，其演变趋势与前者相似，在 2012 年之后，其基于生产的核算占据主导地位，但在此之前，其基于投入核算最大。作为重要的上游原材料供应部门，采矿业部门（M）对 2002-2015 年工业固废的使能排放变化做出了巨大贡献。煤炭采选产品产业（N2）作为重要的煤炭初级供应商，向其下游产业供给工业固废密集型产品，从而产生间接的工业固废流。同时，金属矿采选产业（N4）开采和加工的金属矿石作为中间产品在代谢系统中被利用和再利用，工业固废的间接流动也由此产生。这些间接的工业固废沿着采矿业部门的各类产品的供应链流动，最终成为直接工业固废，在其下游部门的生产活动中排放，如先进制造业部门（AM）中的化学工业（N12）、非金属矿物制品业（N13）和金属冶炼及压延加工业（N14），以及能源和材料转化部门中的电力、热力生产和供应产业（N22）。特别地，电力、热力生产和供应产业（N22）作为能源和材料转化部门（EH）中最大的基于生产的工业固废的贡献者，2002-2005 年其直接工业固废排放量增长了 39.55%，同时在 2010-2012 年增加了 21.80%。初级制造业部门（PM）因消费了农业部门（A）和采矿业部门（M）供给的原材料，导致大量隐含工业固废的排放，也就是基于消费的排放。与此同时，其他服务业部门（OS）在 2007-2010 年间导致的工业固废排放增长率最大，为 59.35%。

综上所述，本研究建立了工业固废的代谢研究框架，从聚合层面和分散层面对珠三角城市群不同类型固废产生的社会经济影响及其原因进行深入分析。总体来说，从聚合层面来看，经济发展、人口、工业固废的产生强度和产业结构是影响该城市群工业固废排放量变化的四个重要的社会经济因素。在分散的部门层面，采矿业部门是关键部门，未来应重点关注基于投入的工业固废减量法规的制定，尤其是在煤炭采选产品产业和金属矿采选产业。本研究所得到的结果有望为这些高排放部门的未来工业固废减量政策制定提供科学依据。

参考文献

- [1] 骆畅. 山地城市绿地生态系统服务价值评估及规划策略研究[D]. 北京林业大学, 2018.
- [2] 邱冰冰. 工业固废催化制备生物炭与合成沸石去除污染物机理研究[D]. 天津大学, 2019.
- [3] 方传棣. 长江经济带矿产资源开发-经济-环境耦合协调发展研究[D]. 中国地质大学, 2019.
- [4] 盛三化. 中国工业化进程中的工业污染预防路径研究[D]. 华中科技大学, 2017.
- [5] 王诗语. 云南省城镇化的资源环境承载力响应及影响因素分析[D]. 云南财经大学, 2019.

-
- [6] 石海佳, 项赞, 周宏春, 等. 资源型城市的“无废城市”建设模式探讨[J]. 中国环境管理, 2020,12(03):53-60.
- [7] 潘永刚, 张卉聪. 关于构建我国“无废城市”再生资源绿色回收体系的建议[J]. 环境保护, 2019,47(09):30-36.
- [8] 李惠萌, 齐水冰, 杨帆, 等. 珠三角区域资源环境可持续性研究[J]. 再生资源与循环经济, 2016,9(08):9-14.
- [9] 刘洁, 马民涛, 廉婕. 浅析珠三角工业结构与环境污染物的灰色关联[J]. 四川环境, 2013,32(02):78-81.