
珠三角碳排放代谢系统健康诊断分析

全球变暖将导致冰川消融和海平面上升，因而成为现代社会面临的迫在眉睫的问题。全球变暖的主要原因是近一个世纪以来大量使用矿物燃料，排放大量的二氧化碳等多种温室气体。过量的碳排放导致的气候变化将对生态系统的健康造成巨大影响：（1）海平面上升。中国沿海地区，如广东、上海一带将被淹没。（2）高原冰川融化，多区域干旱。例如，如果青藏高原冰川融化，中国三江并流将不复存在，水流减少甚至断流。（3）各地沙漠化加剧，沙尘暴频发。（4）干旱地区愈加干旱，洪涝将更加难以控制。（5）生物多样性缺失问题更加严重。若生物赖以生存的气候条件发生变化，物种灭绝速度将不可想象。（6）人类健康危机加剧。随着二氧化碳水平和全球气温的逐渐升高，泌尿系统结石患者增多，传染病如登革热、疟疾，脑炎等将在更大范围内传播，花期变化将导致过敏加剧^[1]。同时，城市化和工业化进程的加速，将导致越来越多的碳排放，给生态系统带来不可逆转的负面影响^[2]。因此，有效控制碳排放，积极应对全球气候变化，诊断与碳排放代谢相关的城市病并提出有效的减排方案是保证生态健康和可持续发展的关键步骤^[3, 4]。

珠江三角洲地区生产总值占广东省比重为 79.3%，其碳排放量较其他地区增速也更为明显。为抑制气候变化，保护生态健康，珠三角地区的经济发展和产业结构调整优化在很大程度上受到低碳经济的制约。其中，广州、深圳、珠海、江门、东莞、中山和肇庆的碳排放量逐年下降，说明珠三角这七个城市发展低碳经济，控制碳排放的宏观战略行之有效。佛山和惠州两城市的碳排放量有升有降，惠州碳排放量波动更为明显，说明佛山和惠州应加大碳排放控制力度，以保证碳排放量的持续下降^[5]。但是，对于经济发展迅速的地区，如何在保证经济发展的前提下实现碳减排值得深入研究。因此，有必要深入探究如何通过产业结构调整，实现总体碳排放量减少的同时也实现单位 GDP 碳排放量减少，以实现经济发展和生态健康协同并进。

为此，本研究开发了基于投入产出模型的珠江三角洲碳排放代谢系统健康诊断模型，通过模拟珠三角 2035 年投入产出表，研究各生产部门间的相互关系，评估系统效率和稳定性，识别碳排放关键部门，建立相关的模拟情景，实现对珠

三角 2035 年动态碳排放的特征情景分析，并针对碳排放峰值年（2012 年）进行进一步深入分析。最终通过探讨产业结构调整，实现总体碳减排及单位 GDP 碳减排。本研究结果，期待提出调整优化珠三角城市产业结构比例与加速发展现代服务业的政策建议，构建珠三角城市群产业结构调整优化的战略目标，以此实现珠三角城市群产业结构低碳化，最终保持生态健康稳定。

为分析生产部门碳排放强度，参考洛伦兹曲线画法，以各部门累计经济产出比例为横坐标，以各部门累计排放二氧化碳占总二氧化碳比例为纵坐标，得到曲线为单调递增，斜率越大说明该部门产生单位经济价值所排放二氧化碳的量越大。

$$EI_i = \frac{p_{ci}}{p_{oi}}$$

$$p_{ci} = c_i / \sum_{i=1}^n c_i$$

$$p_{oi} = o_i / \sum_{i=1}^n o_i$$

其中， c_i 代表部门*i*的碳排放量， o_i 部门*i*的经济总产出。

网络效用分析是用于分析两部门间相互关系的生态分析方法。通过直接效用矩阵 **D** 中的元素 d_{ij} （包括部门*i*到部门*j*的净流量），可以计算得到无量纲总效用强度矩阵 **U**，可由以下公式求得：

$$\mathbf{D} = [d_{ij}] = \left[\frac{(f_{ij} - f_{ji})}{T_i} \right]$$

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}^0 + \mathbf{U}^1 + \mathbf{U}^2 + \dots + \mathbf{U}^l + \dots = (\mathbf{I} - \mathbf{D})^{-1}$$

矩阵 **D** 和矩阵 **U** 中的各元素的正负号分别代表部门在与其他部门交流的过程中获得正效应或负效应。矩阵 **U** 中主对角线上的所有数据都为正值，说明所有部门对自身都有一个正效应。根据矩阵 **U** 中所有元素的正负号，我们可以判断两部门间相互关系。其中 (+,+) 代表共生关系，(+,-) 或者 (-,+) 代表剥削关系，(-,-) 代表竞争关系，(0,0) 代表中立关系。例如， $(su_{21}, su_{12}) = (+, -)$ 表示在部门 1 和部门 2 交流的过程中，部门 1 获得正效应的同时部门 2 获得负效应，在资源或者废物流动中，部门 1 剥削部门 2 的同时被部门 2 控制； $(su_{21}, su_{12}) = (0, 0)$ 表示

从部门 1 到部门 2 的流动恰好等于从部门 2 到部门 1 的流动, 0 不代表二者之间没有交流而是二者之间的交流相等; $(su_{21}, su_{12}) = (-, -)$ 代表竞争关系, 说明部门 1 和部门 2 在交流过程中处于竞争资源的状态, 二者都获得负效应。

值得注意的是, 部门间关系对于整个生态系统的意义具体视情况而定。(1) 当研究对象为资源等正生态要素时 (能源、虚拟水、森林等), 共生关系表明两个部门的交流给彼此都带来正效应, 二者在交流中相互促进, 是一种积极的相互关系, 因此这种关系值得维持和提倡; 竞争关系表明两个部门间的交流给彼此都带来负效应, 二者在交流中相互抑制, 是一种消极的相互关系, 因此这种关系需要被关注和改善。(2) 当研究对象为废物等负生态要素时 (碳排放、重金属排放、固体废弃物污染、废水排放等), 共生关系表明两个部门间的交流给彼此带来正效应, 促进二者排放废物, 给环境带来不利影响, 因此这种关系能够为减排提供机会和途径, 是值得被关注和改善的生态关系; 竞争关系表明两个部门的交流给彼此带来负效应, 能够相互抑制废物的产生, 是一种需要被维持和提倡的相互关系。本研究的生态要素为碳排放, 因此适用第 (2) 种情况。

共生系数是指矩阵 **D** 或者矩阵 **U** 中元素正负号个数的比值, 用于评估系统状态, 可由以下公式求得,

$$M = S_+(U) / S_-(U)$$

其中, $S_+(U) = \sum_{ij} \max(\text{sign}(u_{ij}), 0)$ 表示矩阵 **U** 中所有正元素的个数, $S_-(U) = \sum_{ij} \min(-\text{sign}(u_{ij}), 0)$ 代表矩阵 **U** 中所有负元素的个数。

同样地, 整个代谢系统的状态也分情况而定。(1) 当研究的生态要素为能源、水等正生态要素时, 如果矩阵中正数的个数大于负数的个数时 ($M > 1$), 系统拥有更多积极的部门间关系, 呈现稳定状态; 如果矩阵中正数的个数小于负数的个数时 ($M < 1$), 系统中消极相互关系占主导地位, 系统处于不健康状态。(2) 当研究的生态要素为负生态要素时, 如果矩阵中正数的个数大于负数的个数时 ($M > 1$), 不利关系占主导地位, 系统需要被监测和改善; 如果矩阵中正数的个数小于负数的个数时 ($M < 1$), 大部分部门间相互关系抑制废物产生, 系统处于相对稳定的状

态。

网络控制分析是一种用于衡量生态系统中一个部门对另一个部门依赖关系的科学分析方法，部门间相互依赖程度可以根据一个部门对另一个部门的投入和产出的贡献度来衡量。可以根据部门间二氧化碳物质流计算，具体表示为从部门 i 到部门 j 的总流量与从部门 j 到部门 i 的总流量的比值，用矩阵 $\mathbf{CN}=[cn_{ij}]$ 来表示，可由以下公式求得，

$$cn_{ij} = n_{ij} / n'_{ji}$$
$$\mathbf{N}' = (\mathbf{I} - \mathbf{G}')', \mathbf{G}' = [\frac{f_{ij}}{T_i}]$$
$$\mathbf{N} = (\mathbf{I} - \mathbf{G})', \mathbf{G} = [\frac{f_{ji}}{T_j}]$$

其中，当 $n_{ij} / n'_{ji} < 1$ 时， $cn_{ij} = 1 - n_{ij} / n'_{ji}$ ；否则 $cn_{ij} = 0$ 。例如，当 $cn_{21} = 0.9$ 时，表示部门 1 给部门 2 的影响比部门 2 给部门 1 的影响大，部门 2 对部门 1 的依赖程度为 90%，即部门 2 依赖部门 1 或者部门 1 控制部门 2。

在投入产出模型框架内，特定部门的生产对经济活动中与之有交流的其他部门有两种经济影响。如果部门 j 增加其产出，这意味着部门 j 需要购买或者投入更多的商品以满足其产出的需求，而提供这些商品的部门需要增加其产出以满足部门 j 对商品的需求。这是通常需求侧模型中的因果关系方向。后向联系用于表示特定部门与其购买投入的上游部门之间的这种相互联系。另一方面，部门 j 产出的增加也意味着更多的 j 产品可以被用作其他部门的投入，用于其他部门的生产，也就是说，部门 j 将会增加对生产中使用到的部门 j 的商品的供应。这是供应方模型中因果关系的方向。前向联系用于表示特定部门与其下游部门之间的这种相互联系。

网络联系分析可以帮助判断部门在某生态要素的城市代谢中所起到的作用或担任的角色，通过该分析可以确定最有可能通过经济活动的微小变化减少碳排放的关键部门。前向联系和后向联系计算可由以下公式求得：

$$BL_j = \frac{\varphi_j}{\sum_{j=1}^n \varphi_j / n}$$

$$FL_i = \frac{\delta_i}{\sum_{i=1}^n \delta_i / n}$$

$$\varphi = \theta(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$$

$$\delta = (\mathbf{I} - \mathbf{B})^{-1} \varepsilon$$

其中 BL_j 代表部门 j 的后向联系， FL_i 代表部门 i 的前向联系， $\mathbf{L} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ 为 Leontief 逆矩阵， $\mathbf{G} = (\mathbf{I} - \mathbf{B})^{-1}$ 为 Ghosh 逆矩阵。

在研究碳排放生态要素的案例中， $BL_j > 1$ 说明部门 j 从需求端每增加一个单位的产量时将会产生高于平均水平的排放； $FL_i > 1$ 说明部门 j 从供应端每增加一个单位的产品投入时，将会导致高于平均水平的排放。因此，当一个部门的前向联系和后向联系都大于 1 时，该部门被定义为碳排放关键部门。对于碳排放关键部门经济活动的微小改变将会对整个系统的排放有很大影响，筛选系统中的碳排放关键部门将为探索减排方案提供参考和依据。

系统稳定性分析被用来分析不同年份的效率和储备能力，以评估系统在所研究年份的稳定性。该系统用统一的方法来量化系统的有效性能和储备能力，并用鲁棒性度量来权衡分配。系统的效率从结构角度衡量网络以高效、有序的方式长期保持其完整性的能力。例如，对于特定的生态系统，从采矿业和制造业的物质交换所排放的二氧化碳量很大但其经过的总路径较少，说明其效率很高，当改变发生时系统的自我调节能力弱伴随系统的不稳定性，可由以下公式求得：

$$A = \sum_{i,j} f_{ij} \times \frac{f_{ij} \times T_{..}}{T_{i.} \times T_{.j}}$$

$$T_{..} = \sum_{i,j} f_{ij}$$

$$T_{i.} = \sum_{j=1}^n f_{ij}$$

$$T_{.j} = \sum_{i=1}^n f_{ij}$$

其中， $T_{..}$ 表示整个系统总流量， $T_{i.}$ 代表流出部门 i 的总流量， $T_{.j}$ 表示流入部

门 j 的总流量。

系统的储备能力 C 是指高度多样性和连通性保证系统在遇到改变时保留不同操作，保证系统稳定性的能力。然而太多的并行路径在保证系统储备能力的同时，使得系统的代谢效率低下，并导致代谢活动沿着效率较低的路径流动。

$$C = -\sum_{i,j} f_{ij} \log\left(\frac{f_{ij}^2}{T_i T_j}\right)$$

系统的鲁棒性涉及系统效率和储备能力之间的平衡，测量系统路径的复杂程度，评估系统内部和外部变化的情况下使用替代流路的可能性，为量化可持续性的有效方法。效率和储备能力的比例可以用有序度来表示 $\alpha = A/C$ 。系统的鲁棒性完全取决于顺序和无序，可由以下公式求得：

$$R = -\alpha \log \alpha$$

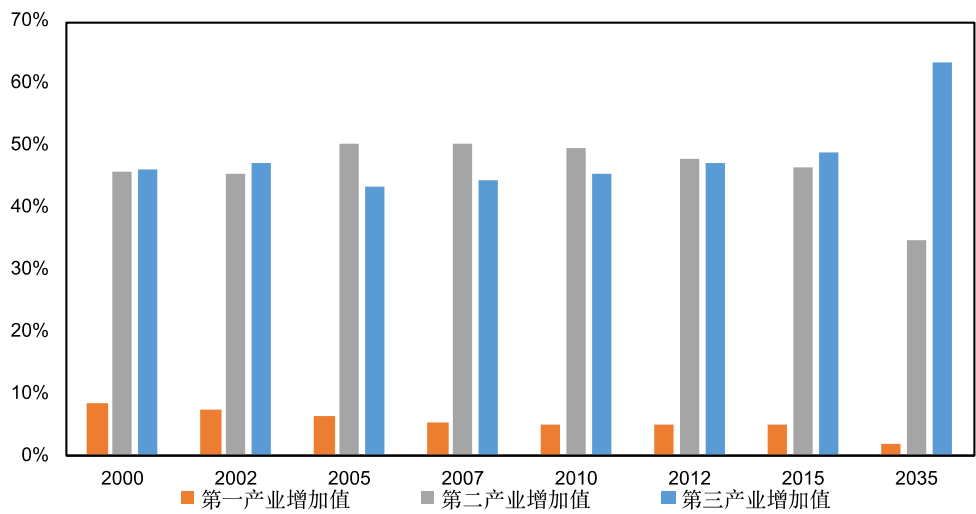


图 1 三次产业占比

改革开放以来，中国城市经济发展迅速、城市化进程加快。珠三角是中国经济总量最大和发展最快的地区，在许多经济指标上都位于全国前列经济发展的同时必然伴随产业结构的调整。珠三角的产业结构经历了从第二产业依赖型经济向第三产业依赖型经济的转变。三个产业占国内生产总值的比例，如图 1 所示。从 2000 年到 2015 年，该地区第一产业占比不断下降，第二产业占比有轻微波动，

第三产业占比呈明显上升趋势。该地区将三次产业占比调整到与经济发展相适应的水平。根据《广东 2035：发展趋势与战略研究》，到 2035 年第一、二产业占比明显下降，第三产业占比明显上升。

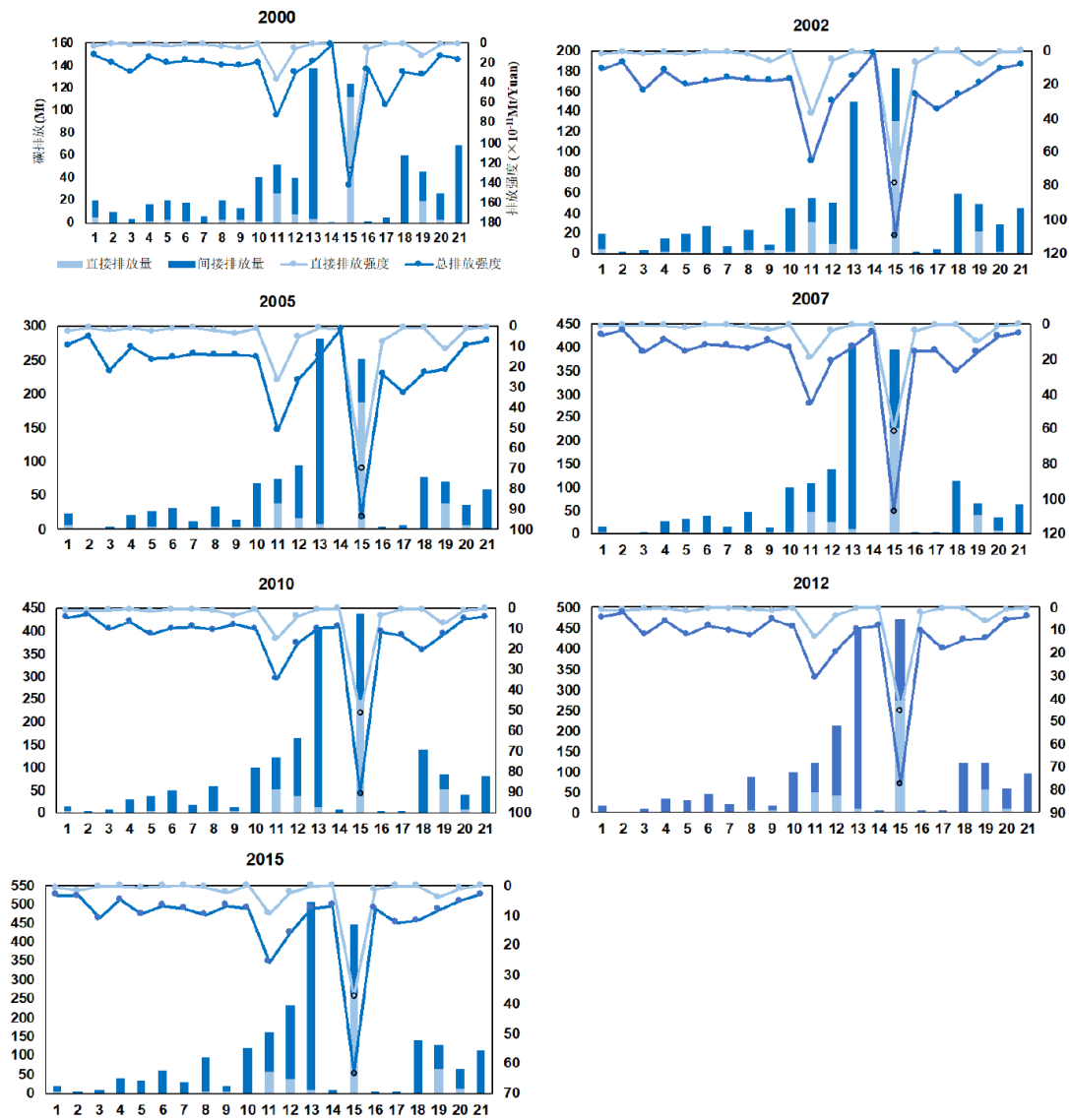


图 2 各部门直接和间接碳排放量及部门对应的直接排放强度和总排放强度

如图 2 所示，一个部门与另一个部门交流，中间要经历不同路径必然存在中间使用产品的消耗，带来大量的二氧化碳排放，因此部门的间接排放远远大于直接排放。从 2000 年到 2015 年，珠三角直接排放强度和总排放强度保持持续下降的状态，各个部门的直接排放强度和总排放强度也保持下降趋势，与珠三角整体

情况保持一致，这一结果可能是由产业结构调整和清洁生产技术的推广引发的。从部门的角度来看，各个部门的直接和间接碳排放量的动态变化以及相应的直接和具体排放强度可以由图 2 看出。值得注意的是，石油开采部门与其他部门不同，其直接排放强度持续增加。除了有些部门某些年份会出现轻微波动以外，绝大多数部门的直接和间接碳排放量明显增加。由于部门本身的性质不同，不同部门的直接排放量差别很大。2000 年，电力生产部门的直接碳排放量是农业部门的 20 倍，而在 2015 年其倍数高达 60 倍。受中间生产过程中使用产品的影响，除了电力生产，非金属矿采产品，金属和有色金属开采和交通运输部门，大多数年份主要部门的间接排放量明显大于直接排放量。显然，各部门的总排放（即直接排放加上间接排放）随时间变化很大，并保持增长趋势。尽管制造业和电力生产部门的总碳排放量都很大，但是制造业部门的间接排放占其总排放量的 90% 以上，而电力生产部门的直接碳排放量占绝大多数。随着时间的推移，化工产品加工部门，建筑业和服务业部门的间接排放量远远大于直接排放量，这对于识别出隐藏的大排放量部门具有重要参考意义。因此，对于珠三角，非金属矿产品、电力生产和交通运输部门应该从生产的角度调整并升级其生产结构，而化工产品加工部门、电力生产部门、建筑业和服务业应该从消费的角度考虑并发展其清洁生产技术。不管从直接还是间接的角度考虑，珠三角金属和有色金属加工部门和煤炭石油天然气开采部门的排放量几乎为零，这可能是因为维持生活生产活动所需的矿采产品和能源可能依赖进口，而不是在区域内自产。在这一时期，直接和总体的排放强度都呈下降趋势，对于煤炭石油天然气开采部门，直接排放强度逐年增加，而总排放强度呈现下降趋势。在调查年份，非金属产品加工和电力生产部门的直接和总排放强度显著高于其他部门。

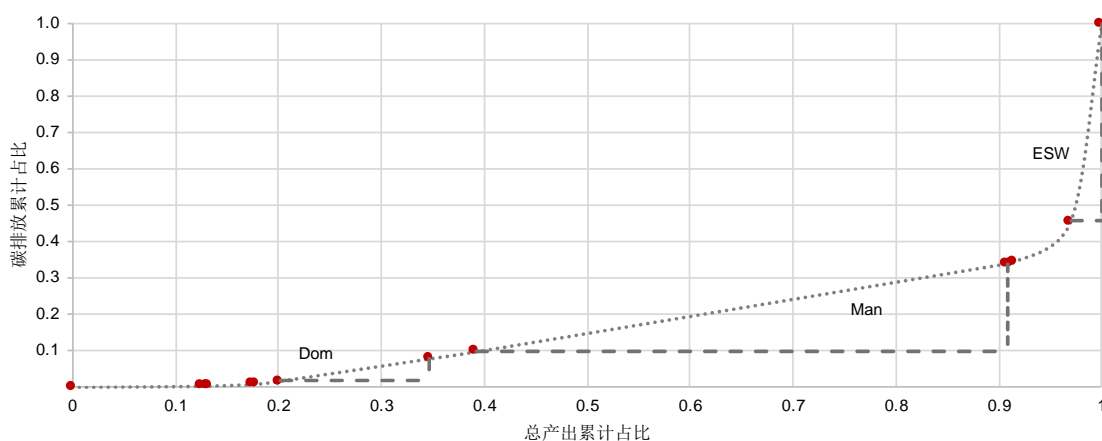


图 3 效率洛伦兹曲线

碳排放强度可由图 3 得出，从图中可以看出，斜率最大的部门是电力生产部门，电力部门是支持经济和社会发展的基础部门，该部门产生单位经济价值排放的二氧化碳的量是批发零售住宿餐饮的将近十倍。因此，应该提高珠三角电力部门能源利用效率，降低单位经济效益二氧化碳排放量，这对整个珠三角地区实现碳减排起重要作用。制造业相对其他部门产生的经济价值很高，排放二氧化碳的量也较高，但是其单位经济价值排放的二氧化碳的量相比其他部门（0.468）处于中间水平。其中金属和非金属产品生产部门是制造业中排放二氧化碳占比很高的部门，而食品日用品生产和加工排放二氧化碳较少。因此，珠三角应注重发展重工业的同时注重产业结构调整，保证经济增长的同时实现减排。消费在 13 个部门中的经济价值和二氧化碳排放量也比较显著，单位 GDP 产生的二氧化碳量处于中等水平，从产生二氧化碳角度来说，消费是一个弹性很大的部门。节约用纸、随手关灯等习惯能大量减少二氧化碳排放。综合上述分析，相比其他部门，从居民消费入手更容易做到降低单位经济价值产生二氧化碳的量。珠三角地区人口众多，所以提高人口素质对于减排有重要作用。

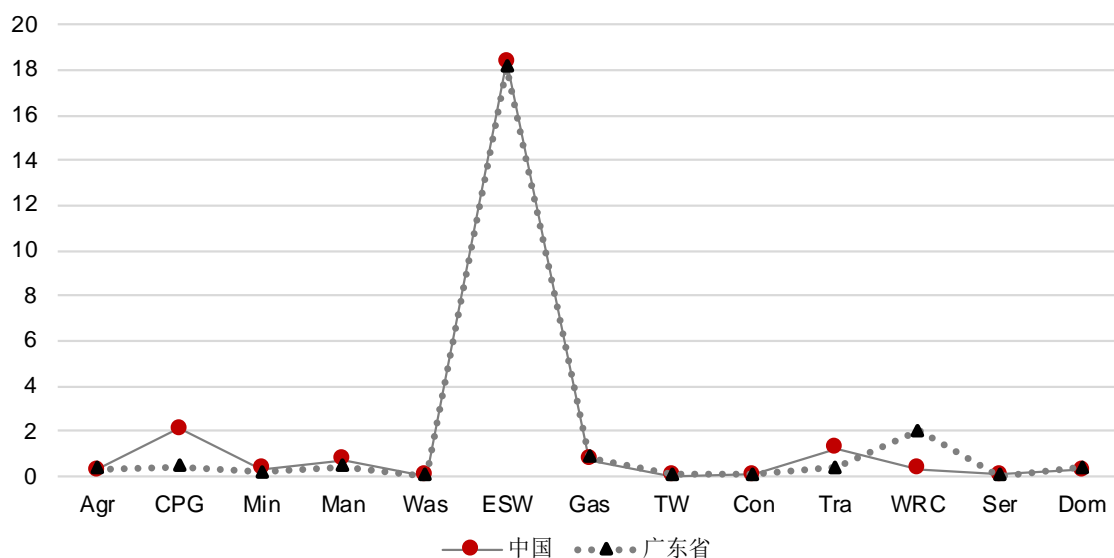


图 4 各部门全国二氧化碳排放率和珠三角二氧化碳排放率对比（百万吨/万元）

如图 4 所示，统计全国二氧化碳排放率（根据全国 42 部门投入产出表，方法与珠三角相同）和珠三角的二氧化碳排放率，分别用实线和点线表示。从对比图中可以看到珠三角的六个部门，包括农业，采矿业，制造业，天然气，建筑业，和服务业二氧化碳排放率与全国基本相同。图中，交通运输部门黄色点位于蓝色点下方，说明该部门二氧化碳排放率低于全国水平。这可能归因于大规模引进电动公交、私家车等代替汽油车等措施。煤炭石油天然气开采部门二氧化碳排放率也低于全国水平。由于珠三角地区能源匮乏，进口率高达 90%，几乎全部依赖外界，因此该部门二氧化碳排放率远低于全国水平。批发零售住宿餐饮部门的黄色点位于蓝色点上方，说明珠三角该部门二氧化碳排放率高于全国。这是由于区域内轻工业发达，产品成本低能够吸引外部消费并拉动经济。

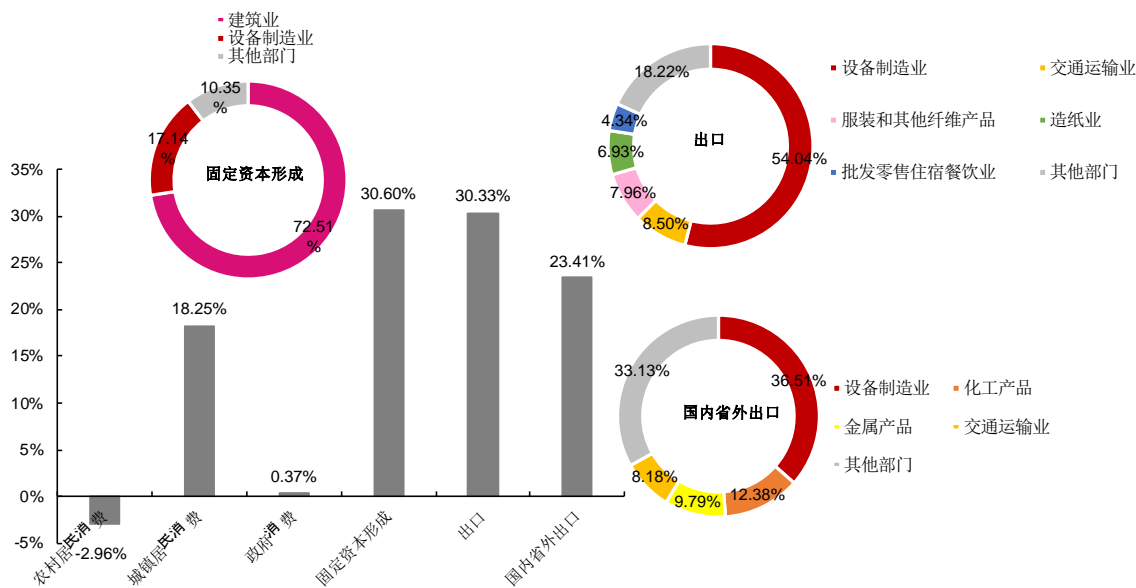


图 5 2000~2015 年各最终需求对碳排放量增加值的贡献

由图 5 可以看到,最终需求分为六大类,包括农村居民消费、城市居民消费、政府消费、固定资本形成、省外出口国际出口。2000 年到 2015 年由于需求增加所引起的二氧化碳的增加值为 260.45 Mt。其中,由于珠三角人口趋于城市化,加之经济发展,导致居民各项消费增加,其中城镇居民消费增加所引起的碳排放增加量为 51.18 Mt, 占总增加量的 18.25%; 由固定资本形成所导致的碳排放量的增加值为 85.82 Mt, 占总增加量的 30.60%, 是导致碳排放增加的主要影响因素,一定时间内购置和建造的固定资产迅速增长造成固定资本形成总额大幅增加; 由于珠三角地区主要发展包含服装等制造业在内的第二产业和批发零售住宿餐饮业在内的第三产业,越来越多的产品及服务出口国外,但是产品及服务在生产过程中将带来巨大的碳排放, 占碳排放量增加值的 30.33% (85.06 Mt)。同时,珠三角地区拥有国内众多加工企业,国内省外出口量很大,因此由该出口引起的碳排放量的增加也很大, 占总碳排放量增加值的 23.41% (65.65 Mt)。

很明显,在固定资本形成总额中,建筑业所占比例为 72.51%, 其次是设备制造部门, 占 17.14%; 由于国内省外出口所造成的碳排放增加值中 36.5%是设备制造部门造成的, 其次是交通运输业, 说明以第二、第三产业为主的珠三角在全国贸易中, 为其他省份提供产品与服务; 由于出口国外所造成的碳排放增加值中 54.04%由设备制造业产生, 8.4%由服装和其他纤维制造业产生, 说明以轻工业为

主的珠三角城市群在国际贸易中主要给国外输送服装及仪器。

表 1 分别将 4 个关键部门的最终需求减少 30%和 60%建立 8 种情模拟情景

关键碳排放部门 (KCES)	情景	最终需求改变	
电力、热力、热水生产和供应部门	ESW-30	-30%	应用RAS 方法得到 2035年投 入产出表
	ESW-60	-60%	
非金属矿采产品	NP-30	-30%	
	NP-60	-60%	
交通运输业	Tra-30	-30%	
	Tra-60	-60%	
金属和有色金属开采业	MNM-30	-30%	
	MNM-60	-60%	

为了配合国家减排承诺，珠三角已经采取了一系列减排计划和措施，包括发展清洁生产技术和倡导节能生活方式。本研究使用的碳排放数据可以从广东统计年鉴（2000、2002、2005、2007、2010、2012 和 2015 年）和广东省投入产出表（2000、2002、2005、2007、2010、2012 和 2015 年）得到。基于这些数据，并参考社会科学院发布的《广东 2035：发展趋势和战略研究》对经济和人口指标进行预测，构建了 2035 年的参考情景。到 2035 年，珠三角 GDP 将达到 26.2 万亿元，约 4.14 万亿美元；珠三角在全国的比重将从 10.7%上升到 12.4%。2035 年，第一、二、三产业的比例将调整到 1.7%、34.8%、63.5%，这与调查期间三次产业的变化趋势一致。到 2035 年，人口将达到 1320 万，而 2016 年为 1090 万。采用 2015 年的直接排放强度作为预测 2035 年排放的关键参考。珠三角 2035 年的投入产出表是根据预测的经济参数和 2000、2002、2005、2007、2010 和 2015 年的投入产出表建立的，它们也被视为回归分析的关键样本值。

在不同程度上减少关键部门的最终需求的情况下，设计了八种情景来探索 2035 年的潜在排放和 GDP 变化。如表 1 所示，ESW-30 情景表示电力生产部门的最终需求减少了 30%，而其他因素保持不变。根据 21 个部门最终需求总量的变化，调整各个行业的相应增加值，然后利用 RAS 方法得到中间矩阵。通过平衡该表，从 2035 年原始投入产出表中得出的新投入产出表最终计算出相应的 GDP 和排放量，最终得到 ESW-30 情景下的单位 GDP 排放量。其他七种场景设置与 ESW-30 相同。应该注意的是，本研究中的所有场景设置更像是假设性实验，

而不是实际预测。探讨某个关键碳排放部门的最终需求变化对排放的影响是一种可能性调查，而不是确定性分析。预测存在争议是正常的，因为它是一个假设性的实验，而不是事实。但是，这些情景可以描述排放趋势，并反映碳减排政策的潜力，所以具有参考价值。

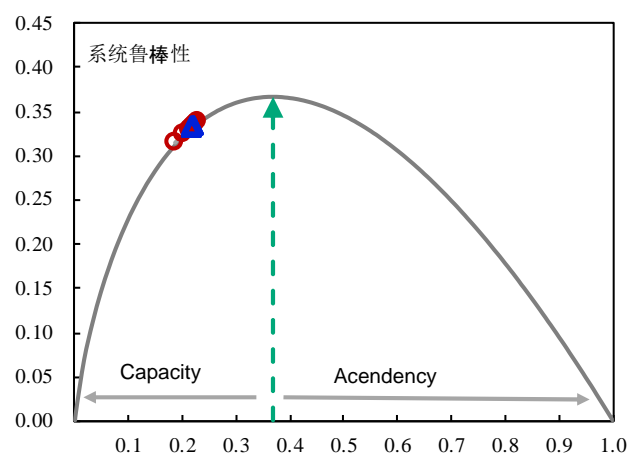


图 6 从 2000 年到 2035 年及 8 种情境下系统碳排放代谢效率和能力

从图 6 中可以看到系统碳排放在 2012 年达到峰值。与 2000-2012 年相比，2012 年至 2035 年显示出下降趋势，表明系统更趋于稳定，各部门之间的联系更加紧密和路径更加复杂。然而，部门间交流复杂性的增加并不一定导致碳排放量的增加，但它能够在保持代谢系统稳定性的前提下为减排提供更为有效的途径和可能性。从图中可以看到，在八种情景下改变各个部门的最终需求会对系统的稳定性产生不利影响，并带来更高的效率，这将在一定程度上对系统的鲁棒性产生负面影响。此外，最终需求变化越大，系统的稳定性就越低。研究期间所有的点都位于鲁棒性曲线的左侧，此时碳排放代谢系统的特点是保持系统稳定性的能力高，效率低，因此就系统鲁棒性而言，基于八种情景的减排模拟是可行的。

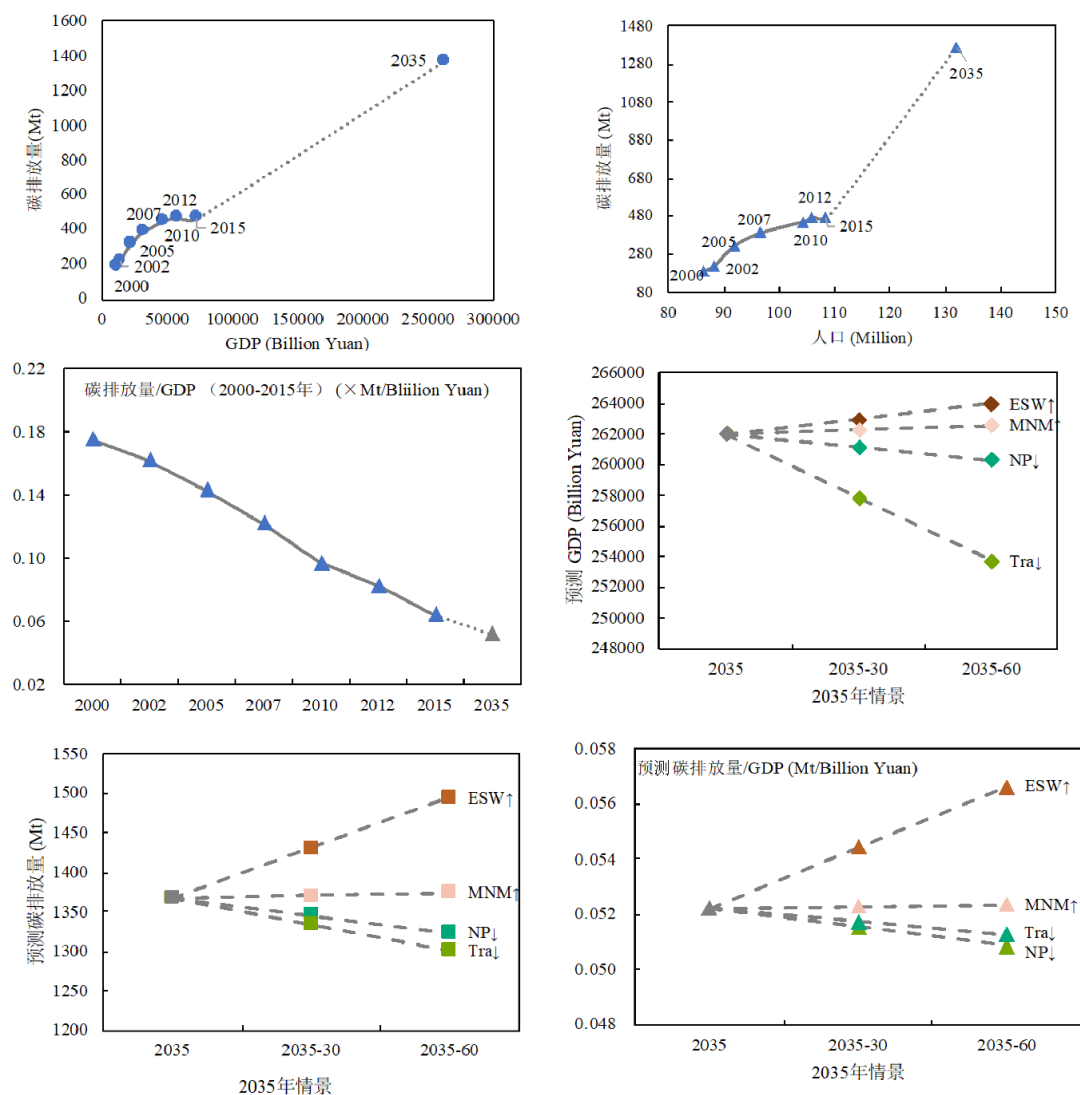


图 7 从 2000 年到 2035 年及 8 种情景下 GDP 和碳排放的关系

2000 年到 2035 年间碳排放代谢情况和社会经济之间的动态可以用图 7 来表示, 结果表明, 随着人口和城市经济的扩张, 碳排放量增加, 研究期间, 碳排放与人口和 GDP 呈正相关。由于工业技术创新和能源结构调整, 直接碳排放量都随着 GDP 和人口数量的增长显著增加, 而增长率显示出下降趋势。在 ESW-30、ESW-60、MNM-30 和 MNM-60 的情景下, 相应的 GDP 和排放量有增加的趋势。相反, 从 Tra-30、Tra-60、NP-30 和 NP-60 的情景来看, GDP 和排放量呈下降趋势。电力生产和金属非金属开采部门的 GDP 和排放量同时增加是由于经常使用外部产品。尽管这两个部门的最终需求减少, 但由于国内生产的消费, 国内生产总值和排放量仍将增加。然而, 一直依赖国内产品的交通运输和非金属产品制造

部门最终需求的减少将导致排放量的减少，同时导致经济下滑，这在一定程度上是减少排放量的一种方式。尽管 GDP 和排放量有所增加，但从 2000 年到 2015 年，单位 GDP 排放量减少了 63%。单位 GDP 排放量的下降趋势持续到 2035 年。电力生产和金属非金属开采部门最终需求的减少将导致单位 GDP 排放量的增加，而交通运输和非金属产品制造部门的最终需求将导致单位 GDP 排放量减少。值得注意的是，为了保证经济发展同时降低单位 GDP 碳排放量，从最终需求来看，碳减排政策应基于减少依赖自身生产产品的部门而不是依赖进口产品的部门。

经济增长是影响中国碳排放的最重要因素。三大产业的发展给珠三角带来巨大的经济效益的同时，也带来了严重的环境污染问题。珠三角各市第一产业生产总值占该市生产总值的比值较小，而第二、三产业占比较大。珠三角九大市，只有肇庆市第一产业生产总值占该市生产总值的 15.5%，其余各市均不超过 10%；第二产业生产总值占地区生产总值比重均超过 25%，其中佛山、惠州和中山三市的比重均超过 50%；第三产业生产总值比重均超过地区生产总值的 40%，广州市第三产业生产总值占地区生产总值的比重高达 71%。珠三角的产业发展呈现出重“工”、“商”而轻“农”的特点，且各市之间产业发展不均衡。合理发展第一产业，要积极发展低碳农业，实施化肥使用量零增长行动，推进畜禽废弃物综合利用，促进农林经济与低碳城镇化发展相耦合，追求低污染、低排放和碳汇的多功能型低碳农业。提倡退耕还林和植树造林，增加森林覆盖面积，更好发挥森林对温室气体吸收和固定作用，减少空气中的二氧化碳的浓度。

综上所述，珠三角工业产业呈现出明显的“高碳”特点，加大减排力度并不是停止工业生产，而是循序渐进，提高低排放工业的比重，降低高排放工业的比重，淘汰落后的工艺和技术设施，减少碳排放。积极推进珠三角九大市的传统服务业向现代服务业转型，努力提高服务业低碳化发展水平，推进电子信息、金融保险、技术顾问等低碳型第三产业的发展。珠三角作为我国新型城镇化综合试点的前沿阵地，必将以身作则，遵循“生态文明，绿色低碳”的基本原则，落实好低碳城镇化建设工作。珠三角将通过优化产业结构、提高能源利用率、加大对“工业三废”的管理力度、开展全民低碳宣传教育和建设低碳示范社区五种路径，加强低碳社会建设，推动低碳城镇化稳步发展，谱写低碳发展新篇章，为

建设“美丽中国”共同努力。

参考文献

- [1] 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]. 华北电力大学(北京).
- [2] Walther G R, Post E, Convey P, et al. Ecological responses to recent climate change[J]. Nature, 2002,416(6879):389-395.
- [3] 刘倩. 我国区域碳排放影响因素研究[D]. 安徽财经大学.
- [4] 卢伊, 陈彬. 城市代谢研究评述:内涵与方法[J]. 生态学报, 2015(08):24-37.
- [5] Li J, Huang G, Liu L. Ecological network analysis for urban metabolism and carbon emissions based on input-output tables: A case study of Guangdong province[J]. Ecological Modelling, 2018,383:118-126.