
基于生态代谢网络结构模型的水资源系统健康状况解析

水是人类和生物生存、社会生产和生态平衡的最基本要素。水生态文明是城市生态文明建设的重要内容和基础保障。水生态文明建设需要遵循人、自然与社会和谐的客观规律。因此，城市群建设中人口增长和社会经济发展应与水资源、水环境相协调。珠三角城市群常住人口占广东省常住人口55%以上^[1]，GDP占广东省GDP 80%以上^[2]，而其人均水资源量仅为1042.45 m³，约为广东省人均水平的57.63%^[1,2]。按照Falkenmark水压力分级标准^[3,4]，珠三角城市群的水资源压力已经接近高压级别。此外，珠三角城市群境内水资源开发利用存在明显的不均衡现象：东部地区为主要的经济和人口重心，东江的水资源开发利用率高达30%以上，开发强度大；西部地区涉及更多城市，西江的水资源丰富，开发利用率却极低。且随着珠三角城市群城镇化和工业化进程加快，水资源综合利用中供、用、排、耗关系和用水结构出现巨大变化，造成了水资源供需矛盾加剧、用水效率低下、浪费现象严重等一系列问题。此外，珠三角城市群地处珠江下游，受上游污染物累积影响，污水处理效率低，年废水排放量高（占广东省75%以上）^[1]，河流中下游河段受到大范围污染，导致该区域出现明显的水质性缺水。水污染问题日益突出，也已经使部分区域水生生物和生境受到严重威胁，给水环境安全带来严峻挑战。缺水危机和水环境压力使珠三角城市群的水生态环境问题突出，社会经济可持续发展难以为继。因此，合理调配和利用水资源、提高水资源利用效率和提升水资源管理能力，是应对水问题、保障水资源可持续利用、促进社会经济永续发展和改善生态环境的必然选择，更是实现最严格水资源管理制度中“三条红线”控制目标的必然要求，是构建珠三角城市群水利现代化体系和全面提升生态安全保障能力的必经之路。

通过引入虚拟水概念，将水资源与各产业部门的产品紧密联系起来，交叉运用城市代谢理论、宏观经济学模型、系统生态学模型研究社会经济发展、生态环境保护与水资源利用之间的多重、动态和复杂关系，是寻找水资源及相关问题有效解决途径的基础。这一概念的引入也可为城市群水生态文明建设提供新视角，有助于从生产、消费和供应端各个环节出发建立跨部门协同管理制度；从改变发展模式、优化产业结构、源头减量、对外开源和对内增效等多个角度出发，提高

水资源调度合理性及水资源循环利用效率，推动水资源高效合理利用，进而推进各个产业和城市群的健康发展。

因此，本研究基于广东省投入产出表序列，构建虚拟水代谢网络，研究了从 2000 年到 2012 年虚拟水代谢网络的动态变化，量化了不同产业构成的生态层级间的拉动和驱动效应，揭示了城市虚拟水代谢系统中各组分之间的相互关系。在此基础上，进一步提出了虚拟水网络循环指数，量化了各部门在网络中的受益程度。该研究能够为虚拟水代谢系统优化和相关部门水资源管理政策的制定提供科学依据。

具体来说，在进行生态层级分析时，首先，通过类比食物链累计放大特征和识别产业用水异质性特性，将所有产业部门合并为 7 个部门和 4 个生态层级。其中 Level 1 包括 A（农业）和 M（矿业）；Level 2 包括 PM（初级制造业）和 ET（物质与能源转换业）；Level 3 为 AM（先进制造业）；Level 4 包括 TI（第三产业）和 C（建筑业）。其次，基于完整流分析计算无量纲积分输入流矩阵 N' 、拉动力权重 W_i 、驱动力权重 W_j 、去除自拉动效应的权重 WO_i 和去除自驱动效应的权重 WO_j 。相关计算公式如下：

$$N' = (n'_{ij}) = (I - G')^{-1}$$

$$G' = [g'_{ij}] g'_{ij} = f_{ij} / T_i$$

$$\Lambda = [\lambda_{ij}] = \text{diag}(T) N'$$

$$W_i = \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_{ij}$$

$$W_j = \sum_{i=1}^n \lambda_{ij} / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_{ij}$$

$$WO_i = (\sum_{j=1}^n \lambda_{ij} - \lambda_{ii}) / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_{ij}$$

$$WO_j = (\sum_{i=1}^n \lambda_{ij} - \lambda_{ii}) / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_{ij}$$

其中， f_{ij} 为从组分 j 到组分 i 的直接虚水流动； T_i 为总投入流矩阵。

部门 i 的虚拟水网络循环指数 $IVWRI_i$ 及整个代谢网络的虚拟水网络循环指数 $IVWRI$ 可表达为：

$$IVWRI_i = \frac{\sum_{j=1}^n \lambda_{ij}}{z_i} - 1$$

$$IVWRI = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_{ij}}{\sum_{i=1}^n z_i} - 1$$

其中， z_i 为成分 i 的边界输入流。

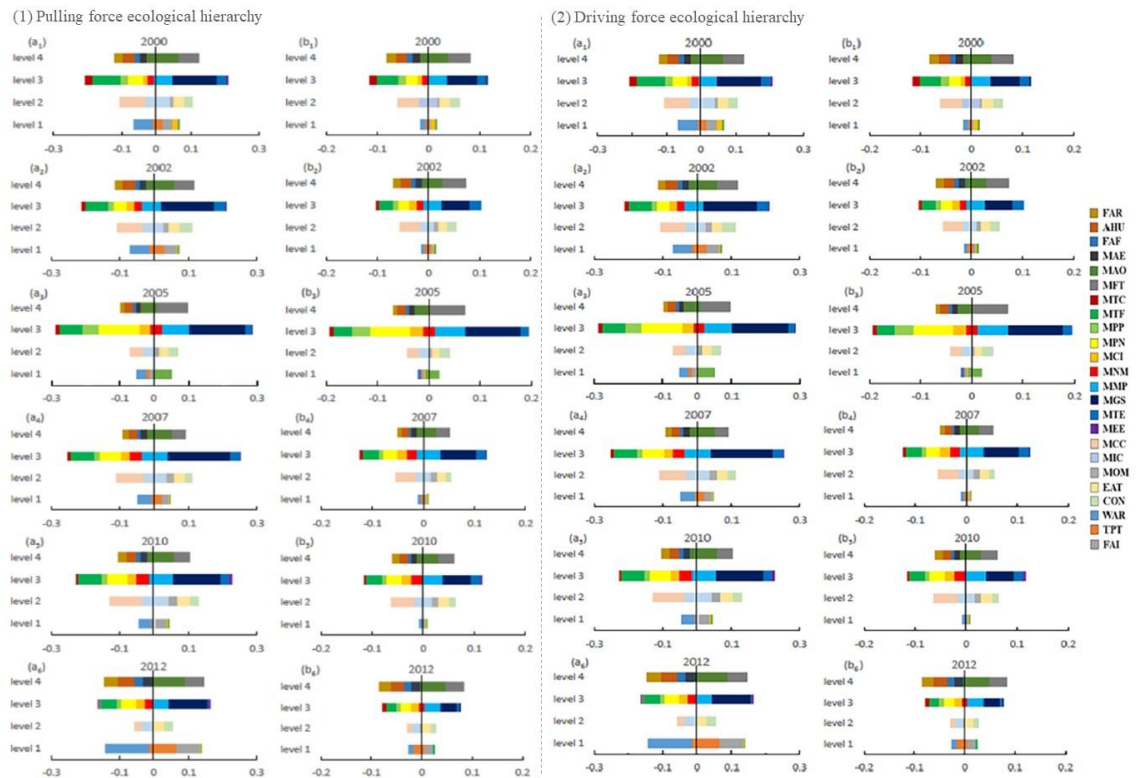


图 1 虚拟水生态代谢层级图：（1）拉动力生态层级图（a1-a6：拉动力层级图；b1-b6：排除了自拉动效应的层级图）（2）驱动力生态层级图（a1-a6：驱动力层级图；b1-b6：排除了自驱动效应的层级图）

结果显示，研究期间（2000 年、2002 年、2005 年、2007 年、2010 年和 2012 年），拉动力生态层级图整体呈现出不规则倒金字塔形。这表明，下游的主导部

门 AM 和 TI 从上游部门 A 和 M 获得可观的虚拟水。这与向高技术和高增加值产业转型的产业结构调整方向一致。造成不规则形状的主要原因是 Level 4 部门对上游部门的拉动力不足，而 AM 对其他部门的拉动力过强。研究期间，Level 1–Level 4 分别呈现先减少后突增，稳定浮动、持续减少和持续增加的变化规律。所有部门的自拉动力比重都较大。因此，当不考虑自拉动效应时，拉动力层级图的形状更理想。驱动力生态层级图也呈现出不规则倒金字塔形。这表明上游部门为下游部门提供大量虚拟水。综合 Level 3 和 Level 4 的拉动力和驱动力在生态层级图中的变动规律，当地产业结构正在由制造业向服务业转变。虚拟水生态层级分析结果表明，研究区域的虚拟水代谢网络整体处于亚健康状态，主要存在第三产业拉动不足和上游产业驱动不足两方面问题。未来，应当在保持初级产品进口力度的同时加快产业转型，将经济重心由制造业转向服务业。

表 1 各部门及整体网络的虚拟水网络循环指数

Year \ Sector	A	M	PM	AM	ET	C	TI	NW
2000	1.74	42.28	16.52	17.64	12.05	3.86	7.72	7.82
2002	1.56	18.89	15.37	15.00	12.64	3.09	5.45	6.76
2005	5.58	517.35	41.81	38.11	31.27	7.65	7.70	18.02
2007	2.20	43.59	21.61	18.79	15.13	2.03	4.39	8.24
2010	2.47	40.83	23.67	16.52	15.57	2.43	4.87	8.67
2012	0.45	8.20	3.05	3.25	3.14	0.13	0.66	2.30

表 1 展示了虚拟水网络循环指数在各个产业中的表现及年际变化情况。可以看出，矿业部门从网络中受益最多，证明了它在网络中的活跃度以及在系统网络连接和虚拟水再分配过程中的重要作用。网络中受益最少的三个部门分别是农业，建筑业和第三产业，他们均位于生态层级的两端，与网络内其他组分间存在互动不足的问题。网络整体的虚拟水网络循环指数始终大于 1，证明了通过循环和再分配向各个产业部门提供的虚拟水量持续大于初始水资源输入量。另外，2005 年与 2012 年出现的两次波动与虚拟水生态层级是否处于理想状态有关，进一步证

明了网络内部结构分布情况直接影响网络整体的节水效果。

此外,针对水量和水质性缺水问题,本研究进一步将虚拟水细分为蓝水和灰水,构建了2010、2012和2015年部门层次的虚拟蓝、灰水清单。在此基础上,基于经济学中的链接理论、Leontief投入产出理论、产业生态学中的城市代谢理论以及由多学科交叉衍生出的复杂网络理论构建了一个虚拟水动态代谢网络,并提出了一个两维度、四角度的网络解构模型,为制定产业部门级别的差异化优化政策,保证珠三角地区经济持续高速发展和水生态健康提供坚实的科学基础。

具体来说,部门*i*对系统经济产出、水资源总消耗量的影响可通过以下公式计算:

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1,i-1} & a_{1,i+1} & \cdots & a_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{i-1,1} & \cdots & a_{i-1,i-1} & a_{i-1,i+1} & \cdots & a_{i-1,n} \\ a_{i+1,1} & \cdots & a_{i+1,i-1} & a_{i+1,i+1} & \cdots & a_{i+1,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n,i-1} & a_{n,i+1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

$$\overline{\mathbf{CI}}_m = (ci_1, \cdots, ci_{i-1}, ci_{i+1}, \cdots, ci_n)$$

$$\bar{\mathbf{F}} = \begin{pmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_{i-1} \\ f_{i+1} \\ \vdots \\ f_n \end{pmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{X}} = (\bar{\mathbf{I}} - \bar{\mathbf{A}})^{-1} \times \bar{\mathbf{F}}$$

$$EOC_i = 100 \times \frac{\bar{\mathbf{e}} \times \bar{\mathbf{X}} - \mathbf{e} \times \mathbf{X}}{\mathbf{e} \times \mathbf{X}}$$

$$\overline{\mathbf{TC}} = \overline{\mathbf{CI}} \times \bar{\mathbf{X}}$$

$$TWC_i = 100 \times \frac{\overline{\mathbf{TC}} \times \bar{\mathbf{e}}' - \mathbf{TC} \times \mathbf{e}'}{\mathbf{TC} \times \mathbf{e}'}$$

式中, $\bar{\mathbf{A}}$ 为部门*i*失效时的投入产出系数矩阵; $\overline{\mathbf{CI}}_m$ 为除部门*i*以外,其他部门的水资源消耗强度向量; $\bar{\mathbf{F}}$ 为部门*i*失效,各部门的最终需求向量; $\bar{\mathbf{X}}$ 为部门*i*失效时,系统的总产出向量; $\overline{\mathbf{TC}}$ 为部门*i*失效时,系统的水资源总消耗量;

EOC_i 为部门 i 失效，系统经济总产出下降的百分比；TWC_i 为部门 i 失效，系统水资源总消耗量下降的百分比。

当部门 i 失效时，进口强度向量需要根据假设提取法的基本假设进行相应调整：

$$\bar{\mathbf{K}} = \left[(k_1 + a_{i1}), \dots, (k_{i-1} + a_{i,i-1}), (k_{i+1} + a_{i,i+1}), \dots, (k_n + a_{in}) \right]$$

式中， k_{i-1} 为部门 $(i-1)$ 的进口强度； $a_{i,i-1}$ 为部门 $(i-1)$ 单位产出需要部门 i 的投入量。

因此，当部门 i 假设失效时，直接代谢网络可以重构为：

$$\bar{\mathbf{E}} = \bar{\mathbf{C}}\mathbf{I} \times (\bar{\mathbf{I}} - \bar{\mathbf{A}} - \bar{\mathbf{K}})^{-1}$$

$$\bar{\mathbf{D}}\mathbf{N} = \bar{\mathbf{E}} \times \bar{\mathbf{A}} \times \bar{\mathbf{X}}$$

在此基础上，通过部门失效对系统可持续性和系统互惠性的影响来反应部门生产活动对系统代谢表现的多维影响：

$$VNC_i = 100 \times \frac{\overline{FCI} - FCI}{FCI}$$

$$VNS_i = 100 \times \frac{\overline{NM} - NM}{NM}$$

式中：VNC_i 为部门 i 的生产活动对系统可持续性的影响；VNS_i 为部门 i 的生产活动对系统互惠性的影响。

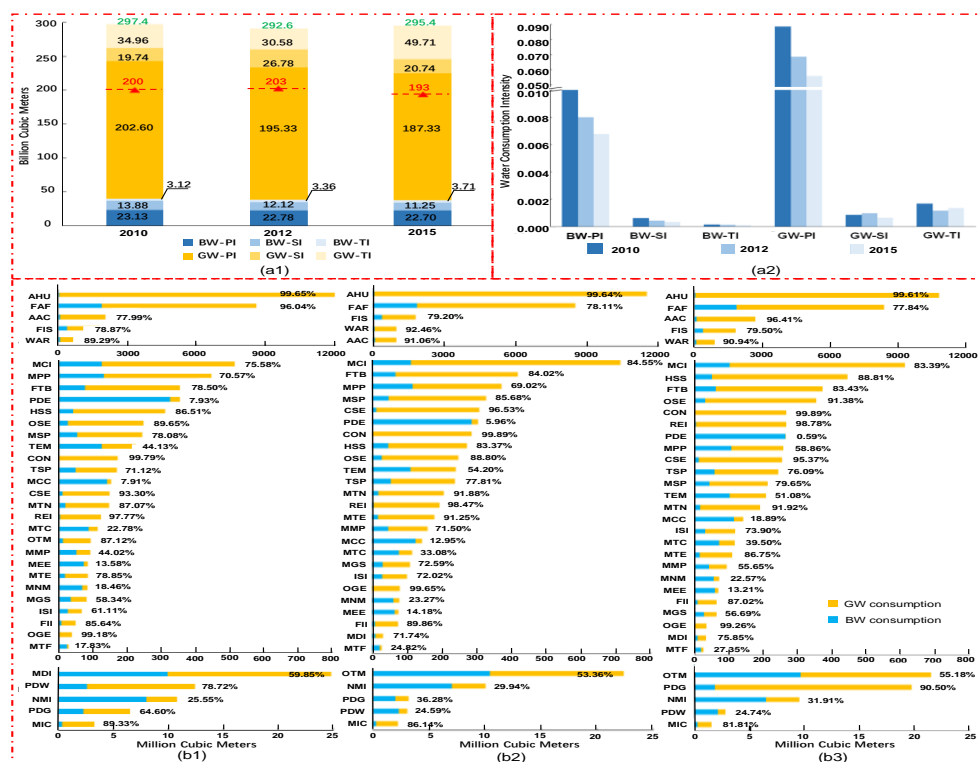


图 2 2010 年、2012 年和 2015 年三大产业水资源((a1)总消耗量(a2)消费强度)及各代谢主体的蓝水 (BW) 和灰水 (GW) 消费(即(b1)、(b2)、(b3))

结果表明, 2010 年、2012 年和 2015 年间, 总用水量均大于当地可用水量。其中, 灰水占 85%以上。在行业层面, 第一产业对蓝水和灰水的需求量最大, 但情况正在好转。从灰水消费量占总水资源消耗量的比例来看, 第二产业最低。但第三产业灰水比最高, 超过 90%。总体而言, 各行业蓝水和灰水强度在研究期间均呈下降趋势 (详见图 2)。大部分经济活动部门的灰水需求量均大于蓝水。另外, 前五大水资源总消耗者在研究期间保持不变。其中, 畜牧业灰水占比最高, 2010 年甚至达到了 99.65%。建筑业、其他服务业和房地产业也有类似情况。但电力、热力生产和分配业的情况完全相反。该行业蓝水消耗占其总消耗量的 99%以上。此外, 第三产业中存在水资源消耗总量不平衡现象。第三产业前两大水资源消费者属于传统服务业, 分别为批发及零售业和餐饮住宿业, 而为经济产出做出重大贡献的信息传递、软件与信息业和金融业水资源消耗量在第三产业中排名最靠后。

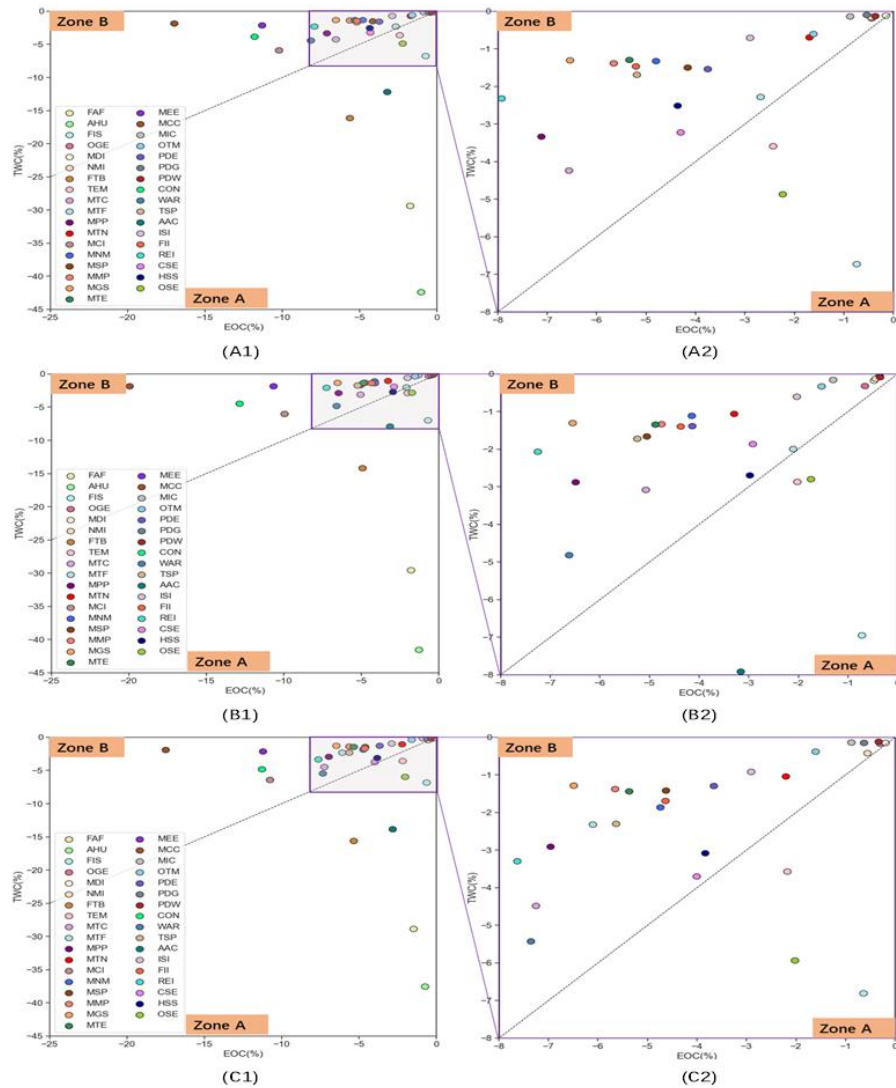


图3 各代谢主体对社会经济系统总产出、水资源总消耗的影响

图3分别展示了各部门在2010年、2012年和2015年对系统经济产出、水资源消耗、系统可持续性和互惠性的影响力。显然，大多数部门在系统经济和总用水量方面的影响力很小。这说明系统的经济产出和水资源消耗量是由少数几个关键部门主导的。就经济维度而言，电子设备制造业（MCC）对广东省社会经济系统的影响力最大，因为它具有最低的EOC值，研究期间为 $[-19.95\%, -17.02\%]$ 。建筑业（CON）在广东省的经济中扮演了第二个重要的角色。如果它被假设提取，整个系统总产出将降低11.28%-12.87%。就用水维度而言，直接用水总量最高的两个部门，畜牧业（AHU）和农林业（FAF），也是对系统用水总量具有最大影响力的两个部门。畜牧业和农林业的失效将导致系统总用水量降低28.86%-42.36%。

畜牧业不但具有惊人的直接用水总量和灰水用量比例，而且该部门对系统总用水量还有着巨大影响力。因此，控制畜牧业生产废水中的污染物浓度对缓解广东省水资源短缺问题至关重要。

表 2 四个区域划分基准

区域名称	关系	部门影响
1 区	$VNS < 0$, $VNC > 0$	降低系统可持续性，但使系统接近互惠状态
2 区	$VNS < 0$, $VNC < 0$	提高系统可持续性，使系统接近互惠状态；间接降低当地水系统压力
3 区	$VNS > 0$, $VNC > 0$	降低系统可持续性，使系统偏离互惠状态；间接提高当地水系统压力
4 区	$VNS > 0$, $VNC < 0$	提高系统可持续性，但使系统偏离互惠状态

为了评估部门对系统可持续性和互惠性的影响，本研究提出了两个指标： VNC 和 VNS 。 VNC 衡量系统可持续性在某个部门失效后的变化百分比。系统可持续性可以在很大程度上代表系统内部循环水的相对量。对于水资源循环量相对较高的系统，增加产出所需的水资源将更多地依赖内部循环水；相应的社会经济系统对自然水系统的依赖度不高，自然水系统受到的压力较小。对于水资源循环相对量很低的部门来说，增加产出将更多地依赖外部水资源投入；这一方面会增加环境系统的负担，另一方面也会提高系统对抗资源可用性冲击的能力。 VNC 为负的部门对提高系统循环水的相对量有正面影响；也就是说，该部门的生产活动增加了部门间循环水流路径的总数，提高系统复杂性。 VNS 揭示部门对系统互惠性的影响力，衡量系统内部部门对之间正效用的相对量在特定部门失效时的变化情况。从生态学的角度看，如果部门 A 对部门 B 的效用为正，说明 A 的存在将为 B 的运行提供支持；如果部门 A 对部门 B 的效用为正且部门 B 对部门 A 的效用也为正，说明这两个部门为互惠关系。也就是说，这两个部门均为对方的生

存发展提供支持。当一个系统由互惠关系主导时，系统内部部门之间能够相互支持，进而降低社会经济系统对外部环境的依赖度。VNS 为负的部门对提高系统正效用的相对量有正面影响。也就是说，该部门的生产活动能够增加系统内部互惠关系，提高系统互惠性。根据 VNC 和 VNS 的符号，我们将所有部门划分在了四个区域中（详见表 2）。

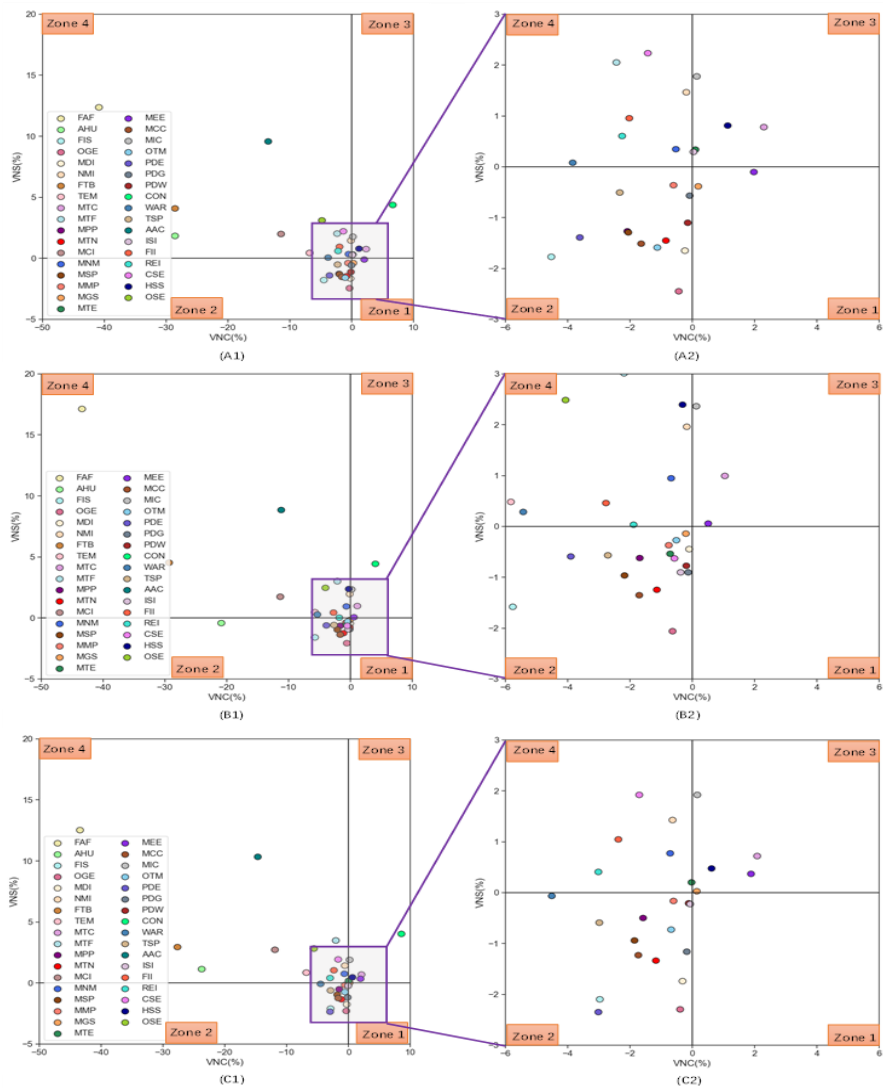


图 4 部门对系统可持续性和互惠性的影响力

从图 4 可以看出，2012 年以后，几乎没有部门属于 1 区，但有 13 个部门在研究期间始终处在 2 区，它们增加了系统复杂性和可持续性、使系统更接近互惠状态，并间接减轻了自然水系统的负担。然而，这些部门的影响力并不大，因为

它们通常位于原点附近的灰色区域。属于 3 区的部门较少，常见的有：建筑业（CON），电气设备制造业（MEE）和卫生、社会保障和社会福利事业（HSS）。其中，建筑业是最有影响力的部门，因为它在两个代谢维度上的影响力均远远大于其他部门。被划分在 4 区的部门通常与食品生产有密切联系，比如：农林业（FAF）、畜牧业（AHU）、食品和烟草行业（FTB）和餐饮住宿业（AAC）。其中，农林业对提高系统水资源循环相对量的积极影响最大；该部门失效将使系统的水资源循环相对量降低 40.94%到 43.45%。同时，农林业对系统互惠性的负面影响也最大；该部门失效时，系统中正效用的相对量将提升 12.37%到 17.13%。

综上所述，虚拟水代谢层级整体在朝着健康高效的方向发展，但处于亚健康状态，存在第三产业拉动不足和上游产业驱动不足的问题。由于为加速经济发展，农业一直被当地政府压缩；当地矿产资源不足，需依靠外部供给；农业和制造业水生产力低，因此，未来，应发展规模经营、引进高级灌溉和种植技术，保持农产品和矿产资源的稳定进口；将制造业的重心从零部件加工和设备组装转移到核心技术创新上；继续优化产业结构，提升现代服务业在产业结构中的比重。此外，蓝水、灰水计量，及所有经济生产活动部门对系统经济总产出、水资源总消耗和代谢性能的影响力的量化结果表明：（1）虽然，研究期间蓝水和灰水强度均呈下降趋势，但总用水量仍偏高。畜牧业、建筑和其他服务业应通过提升技术和节约用水减少灰水消费。（2）系统的经济总产出、水资源总消耗和代谢表现均由少数几个部门主导。其中，电子设备制造业和建筑业主导系统的经济产出；畜牧业和农林业主导系统用水总量；食品饮食相关生产部门主导系统代谢表现。（3）相同部门对系统不同维度表现的影响力存在很大差异，比如：建筑业的生产活动对提高水资源生产力有利，而对优化系统代谢不利。（4）食品饮食相关生产活动降低系统水资源生产力，使系统偏离互惠状态但提高系统可持续性。（5）金属采矿业、造纸印刷文具制造业、石油炼制及焦化业等 13 个部门不但能够提高系统水资源生产力还能提高系统代谢表现。（6）农林业、畜牧业、食品和烟草行业等的生产活动对系统多个维度的表现呈负面影响。因此，在政策制定过程中应当被给予更多关注。

参考文献

-
- [1] 广东省统计局, 国家统计局广东调查总队. 广东统计年鉴, 2020.
- [2] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴, 2020.
- [3] Falkenmark M, Lundqvist J, Widstrand C. Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches: aspects of vulnerability in semi-arid development[J]. Natural Resources Forum, 1989,13(4):258-267.
- [4] Rijsberman F R. Water scarcity: Fact or fiction?[J]. AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT, 2006,80(1-3):5-22.