
考虑具体类别的食物网络代谢模拟技术开发

民以食为天，食物是人类生存的物质基础和战略物资，是国家发展的基础；粮食安全更是人民生活的最基本保障，也是维护国家安全的重要基石^[1]。随着社会经济的快速发展和人口密度的不断增加，食品安全问题越来越严重，因此城市食物代谢的研究是可持续发展议题的重要组成部分^[2]。2020 年以来，全球疫情暴发叠加全球虫害蔓延更进一步凸显保障国内粮食安全的重要性。考虑到世界上 30% 的粮食被浪费，减少粮食损失和提高城市部门对各种粮食的利用率是增加粮食供应的主要方式。同时，减少食物浪费也会产生环境效益，因为食物生产是造成环境破坏和生态恶化的主要活动之一^[3]。然而，食品市场具有敏感性、传导性和放大性的特点（即食品问题会导致严重的社会经济问题），这使得食品安全研究充满了不确定性^[4]。因此，检查食品系统的内部流动并确定每个部门在整体运行中的作用，揭示珠三角城市群受损食物空间退化机理，剖析城市群食品系统的内在时空演变规律及其间互动关系，能够为珠三角地区的粮食风险预报预警以及食品安全管理奠定基础。

广东作为粮食消费大省，粮食自给率不足 40%，已成为我国第一缺粮省份。鉴于食品和能源价格已连续 6 年达到最高点，广东对食品产业结构的调控已刻不容缓。2016 至 2019 年，广东省粮食消费量增速均快于产量增速，粮食生产和消费长期处于“紧平衡”状态。2019 年，全省净调入粮食约 3800 万吨以满足省内粮食消费需求。其中，珠三角核心区常住人口达 6446.89 万人，占全省人口总量的 55.96%。数据显示，2019 年广东省粮食产量达 1241 万吨，其中珠三角九市粮食产量约占广东省总产量的 23.76%。因此，深入研究广东和珠三角核心区域的粮食安全问题，涉及到生态建设、环境保护和经济发展等方面，具有十分重要的意义。

本研究试图从素以“渔米之乡”著称的珠江三角洲地区粮食生产的变迁出发，分析珠三角的粮食生产情况，并对稳定和发展珠三角和广东地区的粮食生产提出建议 and 对策。本研究考虑了不同食物类型，包括粮食作物，糖蔗，烟草，粮油作物，果蔬，肉类，禽蛋，乳制品和水产品九类食品，定量分析了不同类型食物的

拉动效应和驱动效应，探究了直接和间接食物流动的不同表现，揭示了城市新陈代谢系统中各部门之间的相互关系。此外，还引入了流量价值强度指标以建立物理流动和经济流动的联系。通过研究，期望能为食物代谢安全的改革提供科学依据，以改善城市食物消费结构和利用效率。

具体的，该研究使用了投入产出分析和生态网络分析相结合的方法。与其他的经济数学模型一样，投入产出模型也是一种对经济现象的抽象描述模型，它能够反映出经济客体的主要特征。根据里昂惕夫提出的投入产出理论，本研究开发了食物生态投入产出模型，将货币投入产出表转化为物理投入产出表，以进行基本存量，消耗量和流量的计算分析。

$$x_i = \sum_{j=1}^N z_{ij} + f_i \quad \text{for } i = 1 \text{ to } N$$

$$\mathbf{E}_k + \boldsymbol{\varepsilon}_k \mathbf{Z} = \boldsymbol{\varepsilon}_k \mathbf{X}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_k = \mathbf{E}_k [\mathbf{X} - \mathbf{Z}]^{-1}$$

$$\mathbf{EEE}_k = \boldsymbol{\varepsilon}_k \mathbf{X}^e$$

$$\mathbf{EEI}_k = \boldsymbol{\varepsilon}_k \mathbf{X}^i$$

$$\mathbf{EEB}_k = \boldsymbol{\varepsilon}_k \mathbf{X}^e - \boldsymbol{\varepsilon}_k \mathbf{X}^i$$

在生态投入产出模型中， x_i 代表该产业的总产出， z_{ij} 是中间消耗， f_i 是最终消费， \mathbf{X}^e 代表出口矩阵， \mathbf{X}^i 代表各个产业的进口量。 \mathbf{E}_k 是不同生态要素的直接消耗量或释放量，即城市群生态系统与自然生态系统的直接交换量。通过转换可得， $\boldsymbol{\varepsilon}_k$ 为不同生态要素的转换系数， \mathbf{IE}_k 为产业间的生态要素流动量， \mathbf{EEE}_k 为生态要素出口蕴含量， \mathbf{EEI}_k 为生态要素进口蕴含量， \mathbf{EEB}_k 为生态要素贸易平衡量。

生态网络分析方法是基于投入产出模型建立的，从生态学的角度将社会经济系统中复杂的物质流动类比为自然生态网络中的物质流动，是分析生态系统组成要素间作用关系、从整体上辨识系统内在属性的一种分析方法，突出整体性、系统性，注重系统的结构与功能关系研究。该方法在生态系统分析、设计中占有

重要地位，成为认知、探索这一复杂系统的行之有效的方法与工具。

在相互联系的复杂生态网络系统中，所有部门间均存在相互影响的作用关系，并通过作用关系对生态网络系统进行组织、反馈和调节。流量分析是生态网络分析的基础，可以分析生态网络流量分布及主导作用类型，辨识间接作用相对于直接作用的优劣情况。网络控制分析能够量化生态网络系统中的两类关系：1) 两两部门间成对的控制关系；2) 一个部门对另一个部门控制关系或依赖关系。

具体地，基于流量分析，控制分析是通过结合部门间输入端和输出端的综合流量 N 和 N' ，来衡量生态网络系统中的成对控制和依赖关系 $CN=[cn_{ij}]=[n_{ij}/n_{ji}']$ ，若 $cn < 1$ ， $cn_{ij} = 1 - n_{ij} / n_{ji}'$ ，否则 $cn_{ij} = 0$ 。 cn_{ij} 的数值大小表示控制程度的差异。当 $cn_{ij} = n_{ij} / n_{ji}' < 1$ 表示部门 i 的输入效果小于部门 j 的输出效果，则称部门 i 依赖于部门 j 或由部门 j 控制；相反地，如果部门 i 的输出效果的影响大于部门 j 的输出效果，则部门 j 被认为是受部门 i 的控制。

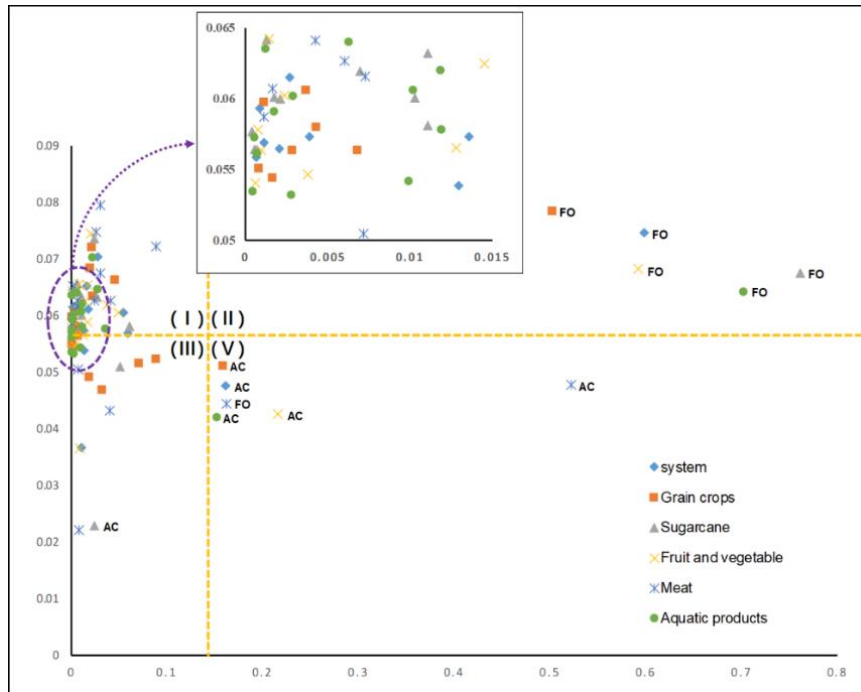


图 1 各部门在不同食物流中的驱动力和拉力

研究表明，系统中的大多数部门往往具有较强的驱动力和较弱的拉动力。其

中，食品加工部门是推动经济增长的主要产业，它具有最大的推动力和拉动力。通过考虑不同的食物组的代谢情况，可以了解不同类型的食品如何影响食物代谢系统。对于食品加工部门，甘蔗对其驱动力增长贡献最大，而肉类的贡献最低；对于住宿和餐饮部门，情况正好相反。该结果说明尽管这两个部门都是食物代谢系统中重要的系统，但是不同部门的功能和责任决定了其生产所需的不同的食物种类，甘蔗等粮食作物主要是初级生产部门使用，而肉类的工业链条较长更适宜住宿餐饮部门等深加工部门（详见图1）。

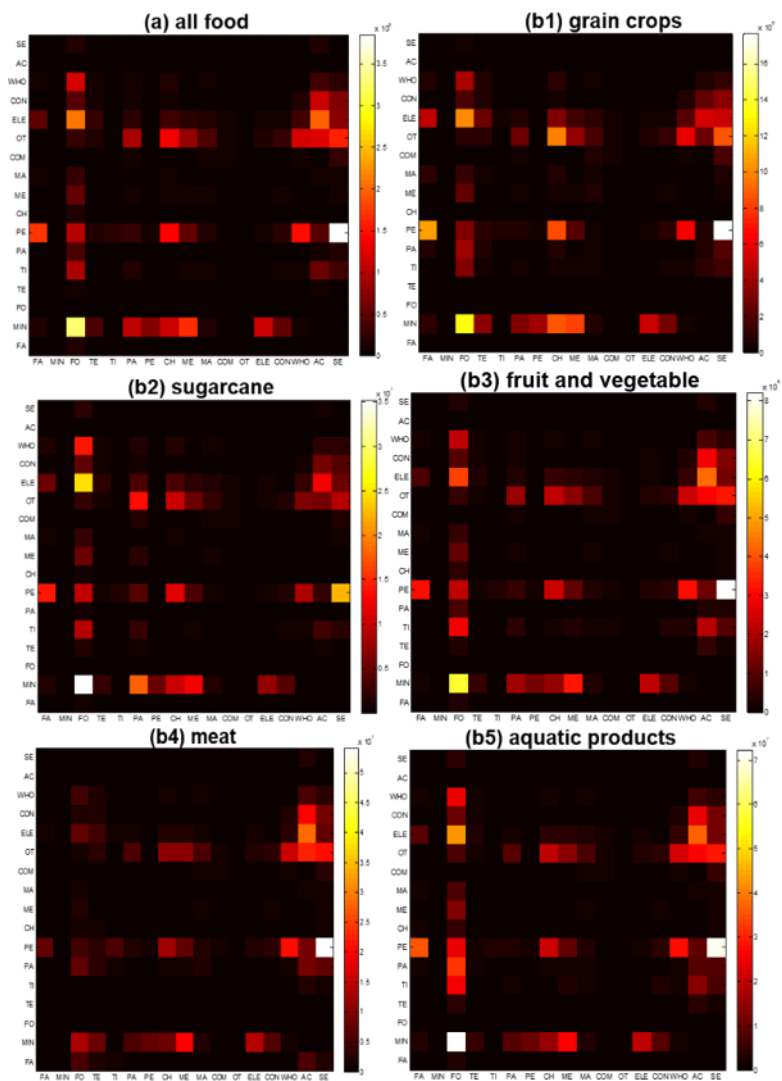


图2 不同食品流量价值强度的比较 (a) 代表所有食物 (b) 代表不同的食物类型

通过引用流量价值强度指标来量化中间产品的商业价值，首次建立物质流动

和经济流动的联系。考虑不同食物的流量价值强度，我们发现，五种食物类型与“所有食物”之间的价值强度变化趋势几乎没有差异，这表明食物类型和食物流量所产生的商业价值之间几乎没有相关性。食物类型影响商业价值，反映在不同食物的单位价格上。食品单价（如肉类）越高，食品的流量价值强度值越高。从流量价值强度的大小来看，甘蔗，肉类和水产品在每吨食物流通中创造了更高的商业价值。不同的部门有不同的经济价值载体。例如，农业部门和食品加工部门主要依靠肉类流动在部门之间创造商业价值，纺织品部门和木材加工部门主要依赖于水产品，而住宿和餐饮部门主要依赖于粮食作物。对于其他部门，水产品对跨部门商业价值的贡献相对较高，其次是肉类。

商业价值的体现与行业本身的社会活动有关。详细地说，在肉类的流动下，住宿餐饮部门的中间商品价值高于食品加工部门，与在其他食物流中的结果是相反的。这一结果表明，住宿和餐饮业可以更直接地从肉类流动中获利。能源提取部门和食品加工部门在甘蔗流动中的经济价值突出，得益于珠三角地区积极推广使用可再生能源如燃料乙醇等的试验研究（详见图2）。

总的来说，珠三角的食物代谢存在一定健康问题，主要表现为粮食自给率不足。鉴于食品和能源价格已连续 6 年达到最高点，珠三角对食品产业结构的调控已刻不容缓。具体地，可考虑优化产业间的粮食使用结构进行一定的调节。例如，住宿和餐饮业可以考虑发展肉类粮食；能源提取部门和食品加工部门可以重视甘蔗的使用，并联合其他行业积极推广使用可再生能源如燃料乙醇等的试验研究。

参考文献

- [1] Mengyu Z, Guohe H, Lirong L, et al. Network analysis of different types of food flows: Establishing the interaction between food flows and economic flows[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2019,143.
- [2] Gloria S, Xiaoyu Y. Food-energy-water nexus: A life cycle analysis on virtual water and embodied energy in food consumption in the Tamar catchment, UK[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2018,133.
- [3] Xue L, Liu G, Parfitt J, et al. Missing Food, Missing Data? A Critical Review of Global Food Losses and Food Waste Data.[J]. Environmental science & technology, 2017,51(12).
- [4] Shafiee-Jood M, Cai X. Reducing Food Loss and Waste to Enhance Food Security and Environmental Sustainability.[J]. Environmental science & technology, 2016,50(16).