

城市食物-能源-水系统的关联关系研究： 以广州市为例*

高成康¹⁾ 朱素龙^{1)†} 张帅兵²⁾ 余 猛¹⁾ 孟祥禹¹⁾ 李晓军³⁾

(1)东北大学冶金学院, 国家环境保护生态工业重点实验室, 110819, 辽宁沈阳; 2)吉利汽车研究院, 315336, 浙江宁波;
3)中国科学院, 沈阳应用生态研究所污染生态与环境工程重点实验室, 110016, 辽宁沈阳)

摘要 食物-能源-水(food-energy-water, FEW)是人类赖以生存的基础资源,且三者之间存在密切的关联关系。2011年世界经济论坛首次将“FEW风险群”列为未来10年影响全球格局的3类重要风险集合。本文基于物质流和能量流的分析方法,识别出3种代谢网络中具有关联的节点和路径。基于识别出的关联节点和路径,分析了FEW间的关联及相关指标。结果表明:2017年广州市食物生产相关的用水总量为 $12.19 \times 10^8 \text{ m}^3$,能源相关的用水量为 $22.91 \times 10^8 \text{ m}^3$,食物生产有关的能源消耗为 $11.36 \times 10^4 \text{ tce}$,与水有关的能源消耗为 $21.27 \times 10^4 \text{ tce}$;广州市资源消耗水平逐渐增加,资源指数迅速恶化,资源自给率水平逐渐降低,对环境影响也呈加强趋势,各子系统间的依存度和关联逐渐加强。

关键词 物质流;能量流;食品-能源-水关联关系;广州市;评价指标

中图分类号 TL812

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2021108

0 引言

食物-能源-水(food-energy-water, FEW)是人类不可或缺的基础性资源,支撑着人类生存和社会经济发展^[1]。预计到2030年,全球能源需求较2012年增长50%^[2],到2050年,全球水资源需求预计较2000年增长55%^[3],到2050年,食物需求也较2012年增长50%^[4]。与此同时,FEW 3个系统之间的复杂关系相互影响^[5]。目前,3个系统之间相互独立的资源管理与政策,难以实现FEW资源系统的集成管理,造成了资源的低效使用和浪费。

FEW的关联关系的议题逐渐成为世界性热点^[6]。其理念可追溯到20世纪70年代,Meadows等^[7]对全球人口、经济和FEW等之间的关系进行了初步的探讨。随后,美国、日本等国的学术界对FEW之间的两两关系进行探索研究^[8]。2011年,在德国召开的波恩会议,主题为“FEW关联关系-绿色经济解决方案”^[9]。2015—2017年三者之间的研究成果呈现出井喷式发展。目前,关于FEW-Nexus的研究非常活跃,其研究集中在充分认识食物、能源和水间的复杂关联关系以及制定具有地方特性的可行政策^[10]。但对FEW-Nexus并没有形成统一的概念,在关联关系的量

化方法上存在障碍,因此,研究仍处于探索阶段^[11]。学者们从不同角度运用不同方法,围绕FEW-Nexus展开理论探讨与实证检验,不断充实并丰富了水、能源和粮食关联系统的研究,为后面的研究奠定了基础。当前,在量化分析的方法建立上并不统一,出现了众多的理论模型;Mannan等^[12]回顾了FEW之间的内在联系,总结了近期在量化方法方面的进展,指出当前研究并无统一的标准定论,生命周期分析、投入产出分析等方法被较多采用;Das等^[13]将技术-生态协同概念应用于优化食物、能源、水中,以设计一个在生态可持续性约束下,共同生产食物和能源的系统。González-Bravo等^[14]以FEW关联的视角建立多目标优化数学模型,分析水资源在FEW网络中如何分配的问题,并将其应用到墨西哥索诺兰沙漠的研究;Bergendahl等^[15]指出采用跨学科的方法可能更适用于FEW关系研究,并通过生物固体案例说明了FEW关系。FEW关系的研究方法主要包括了清单法、生命周期评价以及投入产出,通过这些方法分析FEW子系统之间的足迹影响和解析FEW资源在经济系统中的投入产出过程。

指标方法为评估FEW关联关系的有效方法。FEW关联关系的状态评估主要是建立评价体系,通

* 国家自然科学基金资助项目(41871212);中央高校重点科学研究引导项目(N2025008)

† 通信作者:朱素龙(1994—),男,博士生。研究方向:工业生态学。E-mail: zhu_sl@126.com

收稿日期:2021-04-25

过评价体系来衡量 FEW 在社会经济系统中的可持续性和适应性^[16]。Moioli 等^[17]开发了一种评估 FEW 关系的新方法,评估了水和土地利用与生物能源生产中的粮食生产之间的相互关系;El-Gafy^[18]通过指标分析了 2010 年埃及的 FEW 的关系,上述研究仅通过指标分析 FEW 之间的关系,而本文从各子系统的安全视角及各系统之间的协同性出发,分别从消费需求、资源自给率、资源利用强度和效益、综合指标、环境输出等 5 个层面确定 FEW 系统的评价指标,旨在反映系统的资源消耗水平、未来发展安全、对环境产生的影响及系统的相关性。

针对 FEW 关联关系的研究尚处于探索和实证检验阶段,相关表述较为模糊,在概念上尚未对“nexus”(关联关系)有个清晰界定,在关联关系的量化方面存在方法论上的障碍,多是从定性角度来阐述它们之间的联系。本研究的目的是寻求在城市层面建立 FEW 协同分析的量化分析方法,实现从概念到行动的过程转变,建立城市地区的 FEW 系统网络分析模型,构建 FEW 系统指标评价体系,分析系统的关联关系。

1 理论及方法

1.1 研究区域概况 本案例研究以广州市行政区域为空间边界,选取 2013—2017 年作为时间边界。广州市地处中国南部、濒临南海、珠江三角洲北部,截至 2018 年,全市下辖 11 个区,总面积 7434 km²,建成区面积 1249.11 km²,常住人口 1490.44 万人,城镇人口 1287.44 万人,城镇化率达 86.38%。

1.2 数据来源 本案例所用到的数据主要来自 2014—2018 年 5 年的广州市统计年鉴、2013—2017 年广州市水资源公报和 2013—2018 年中国城市统计年鉴。

1.3 研究方法

1.3.1 物质流和能量流分析方法 基于物质流分析方法,分析城市食物(N)、能源和水 3 类资源的代谢流动。各类食物以含元素 N 的流量来表征食物的流量,能源品种的消耗量统一折算成标准煤当量。食物、能源和水代谢网络模型主要基于质量守恒定律所构建,即输入等于输出。

对于不同种类的食物,N 元素的含量和物质成分并不相同,其中本地所产农作物进入食品加工环节的物质含 N 量为

$$W = \sum_{j=1}^s W_j \cdot C_j, \quad (1)$$

式中: W_j 是 j 类农作物年产量,如水稻、大豆、花生

等,单位为 t; C_j 是 j 类农作物含氮量的系数。

由食品加工节点流入城镇居民节点的食物含 N 量为

$$F = \sum P_i \cdot (W_{n_{m_i}} \cdot z_m + W_{c_{\ell_i}} \cdot C_{\ell} + W_{s_{k_i}} \cdot C_k), \quad (2)$$

式中: P_i 为第 i 年城市总人口; $W_{n_{m_i}}$ 为城镇居民第 i 年 m 类农作物的人均消费量; $W_{c_{\ell_i}}$ 为城镇居民第 i 年 ℓ 类畜禽类产品的人均消费量; $W_{s_{k_i}}$ 为城镇居民第 i 年 k 类水产品的人均消费量; z_m 为 m 类农作物含氮系数; C_{ℓ} 为 ℓ 类畜禽含氮系数; C_k 为 k 类水产品含氮系数。

能源代谢网络中各节点的代谢流量为

$$E_{\text{tot}} = \sum C_k \cdot e_k, \quad (3)$$

式中: E_{tot} 是某节点能量代谢总量; e_k 表示进入该节点的能源产品种类,本文研究的能源产品主要包含煤、石油、天然气、电力等; C_k 是各种能源产品折标煤系数。

水资源代谢网络中各节点的代谢流量为

$$w_{\text{tot}} = \sum w_i = \sum (w_{\text{output}} + w_{\text{loss}}), \quad (4)$$

式中: w_i 是特定节点各输入项的水; w_{loss} 是水在传输分配过程中的损失量; w_{output} 是进入该节点后流向下一过程的量。

1.3.2 关联性计算模型 在参考相关研究成果并结合本研究的实际基础上,构建 FEW 关联关系的相关性计算模型,具体公式为

$$O = \left[\frac{\sum_{i=1}^m a_i \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \times \sum_{i=1}^n b_i \frac{y_i - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}}}{\left[\frac{\sum_{i=1}^m a_i \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} + \sum_{i=1}^n b_i \frac{y_i - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}}}{2} \right]^2} \right]^{1/2}, \quad (5)$$

式中: a_i 、 b_i 分别为各子系统中各指标的权重; x_i 、 y_i 分别为系统中数据; x_{\max} (y_{\max})、 x_{\min} (y_{\min}) 分别为系统中最大值和最小值; O 为耦合度,取值范围为 0~1。 O 越接近 1,表示各系统间的耦合度越大; O 越接近 0,表示各系统间的耦合度越小,各序参量处于无关且无须发展的状态。

1.3.3 FEW 综合网络评价指标 熵值法确定指标权重: 正向指标

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{ij\min}}{X_{ij\max} - X_{ij\min}}, \quad (6)$$

负向指标

计算差异系数

$$X'_{ij} = (X_{ij\max} - X_{ij}) / (X_{ij\max} - X_{ij\min}), \quad (7)$$

$$g_j = 1 - e_j. \quad (10)$$

式中: X_{ij} 表示指标 j 第 i 年的值, i 表示年份, j 表示指标项; X'_{ij} 是标准化后的指标值; $X_{ij\max}$ 、 $X_{ij\min}$ 是指标 j 历年的最大值、最小值。

熵值越小, 指标间的差异性越大。

确定指标 j 权重

计算指标 j 第 i 年指标值的比例

$$z_j = g_j / \sum_{i=1}^m g_j. \quad (11)$$

$$P_{ij} = X'_{ij} / \sum_{i=1}^t X'_{ij}, \quad (8)$$

最后根据得到的水对总量、效率、对外依存度、环境输出、系统关联性的综合评价指标, 分别加权得出 FEW 系统的综合发展状况的综合评价指数。

式中 t 为统计时间, 单位为 a 。

确定信息熵

FEW 综合网络系统之间存在关联, 使总系统在各子系统或各节点的协同作用下, 朝着某个方向发展。为了解系统的总体发展情况, 本文试图建立适用于城市 FEW 系统评价指标体系, 其指标权重与类型如表 1 所示。

$$e_j = -(1/\ln m) \cdot \sum_{i=1}^m (P_{ij} \cdot \ln P_{ij}), \quad (9)$$

式中: e_j 是指标 j 的信息熵, 取值范围是 $[0,1]$; 当 $P_{ij}=0$ 时, $e_j = 0$ 。若 $P_{ij} = 0$, 则定义 $\lim(P_{ij} \cdot \ln P_{ij}) = 0$ 。

本文综合考虑 FEW 之间的相互作用机制, 遵循

表 1 FEW 系统评价指标

目标层	基准层	指标 X_j	含义	单位	权重	指标类型
食物-能源-水系统	总量指标	用水总量	城市生产生活用水总量	10^8 m^3	0.2066	负
		能源消耗总量	城市能源消耗	万吨	0.1900	负
		食物(N)消费总量	居民生活消耗食物含N总量	t	0.2761	负
		食物(P)消费总量	居民生活消耗食物含P总量	t	0.3272	负
	效率指标	人均用水量	生活用水比上总人口	$\text{L} \cdot (\text{人} \cdot \text{d})^{-1}$	0.2329	负
		人均能源消费	生活用能比上总人口	$\text{kgce} \cdot (\text{人} \cdot \text{d})^{-1}$	0.1473	负
		人均N摄入	人均摄入食物中含有的N	$\text{kg} \cdot (\text{人} \cdot \text{a})^{-1}$	0.2654	负
		人均P摄入	人均摄入食物中含有的P	$\text{kg} \cdot (\text{人} \cdot \text{a})^{-1}$	0.1479	负
		万元GDP能耗	总的能源消费与GDP比值	$\text{tce} \cdot \text{万元}^{-1}$	0.0989	负
		万元GDP用水	总的用水量与GDP比值	$\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$	0.1075	负
	对外依存度	能源自给率	本地能源生产量与能源消费量的比值	%	0.1741	正
		食物(N)自给率	本地食物N产量与食物(N)消费总量的比值	%	0.5320	正
		食物(P)自给率	本地食物P产量与食物(P)消费总量的比值	%	0.1533	正
		水资源自给率	本地水资源供给量与水资源消费总量的比值	%	0.1406	正
	环境输出指标	废弃物中N总量	食物消费系统产生的废弃物未被利用而排入环境中的N	t	0.3033	负
		废弃物中P总量	食物消费系统产生的废弃物未被利用而排入环境中的P	t	0.3762	负
废水排放量		城市生产生活产生的废水	10^8 m^3	0.3204	负	
系统关联性	生产水的能耗	水的生产供应节点对能源系统的影响	$\text{kgce} \cdot \text{m}^{-3}$	0.0884	负	
	生产电力的取水量	电力生产对水系统的影响	$\text{m}^3 \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	0.0642	负	
	农业种植产出N的水耗	农业生产对水系统的影响	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	0.0839	负	
	农业种植产出P的水耗	农业生产对水系统的影响	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	0.0642	负	
	农业种植产出N的能耗	农业种植对能源系统的影响	$\text{kgce} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.3060	负	
	农业种植产出P的能耗	农业种植对能源系统的影响	$\text{kgce} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.3098	负	
	加工石油的水耗	石油加工对水系统的影响	$\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$	0.0648	负	

科学性、动态性、数据可得性和层次性原则,从各子系统的安全视角及各子系统之间的协同性出发,分别从消费需求、资源自给率、资源利用强度和效益、综合指标、环境输出等 5 个层面确定 FEW 系统的评价指标,旨在反映系统的资源消耗水平、未来发展安全、对环境产生的影响及系统的相关性.建立了综合评价确定指标如表 1,共计 24 个指标.

2 结果与讨论

本节涉及食物产出量,由于 N、P 均含在食物中,二者均可表示食物产量,所以为方便分析,除非特别说明,在 2.3 和 2.4 节中均用 N 元素量来表示食物量.

2.1 FEW 综合网络 在城市系统中 FEW 网络中有

相同的节点,如水的生产供应节点、能源的加工转化节点等.由于这些网络节点存在使得 FEW 系统之间存在物质和能量的传递和交流,这说明城市内 FEW 代谢系统是相互联系、相互依存的.通过找出 3 个子系统间相互关联的节点,如水-能源、食物-能源、水-食物,形成一个涉及 3 个子系统的互联互通的综合系统,水、能源和食物代谢网络间产生直接关联的节点中有水的生产供应、废水处理、火力发电、石油加工炼焦、农业种植、畜牧养殖和食品加工等节点.以 2017 年广州市水、能源和食物的代谢网络构建的 FEW 关联网络如图 1 所示,图中符号所表示的含义见表 2.

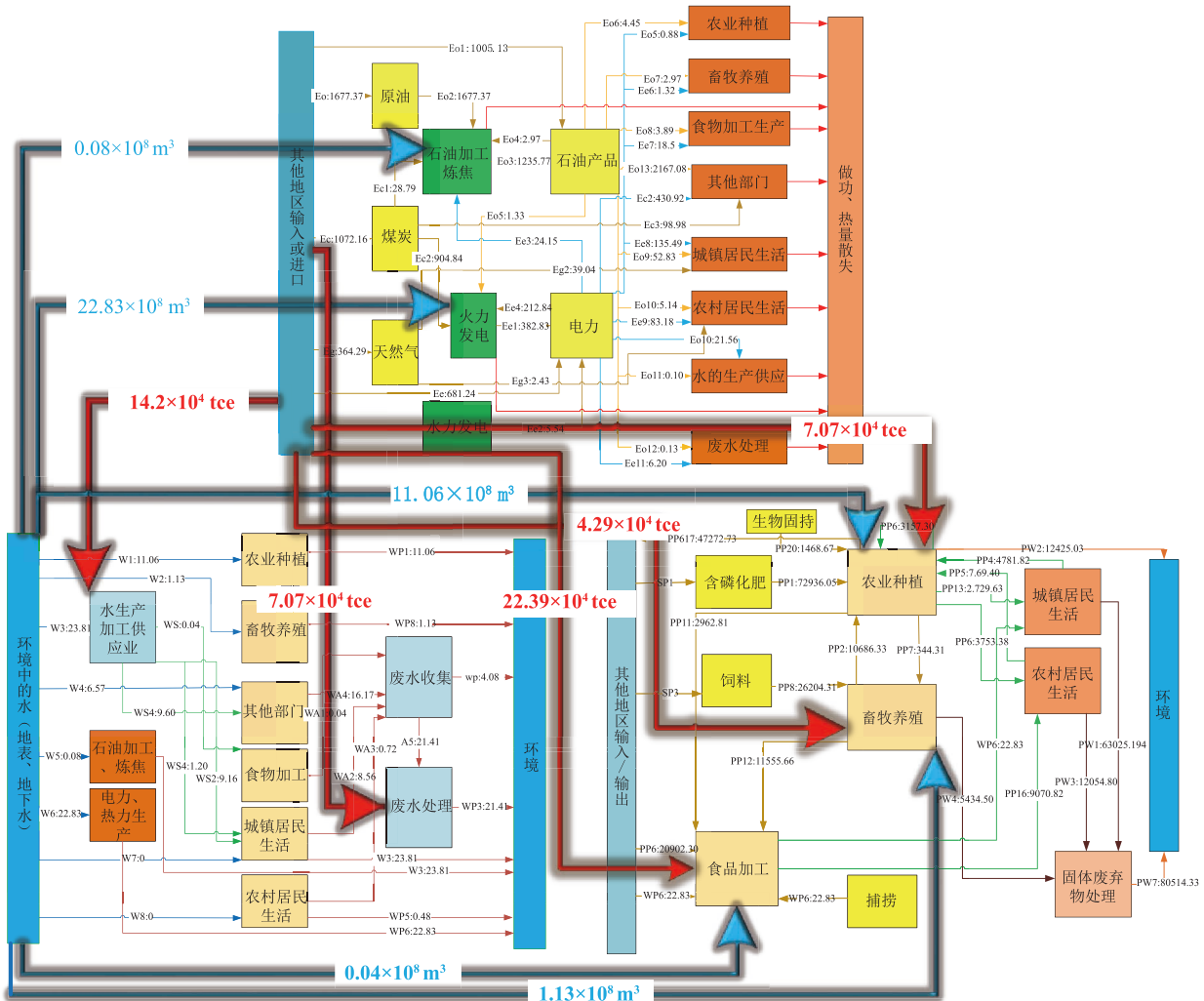


图 1 FEW 综合网络

图 1 反映了 FEW 代谢网络间相关节点和代谢路径:在水和食物网络方面,水资源系统和食物系统的关关节点为农业种植节点、畜牧养殖节点和食品加工节点.2017 年广州市水资源网络流入食物代谢网络总水量为 $12.19 \times 10^8 \text{ m}^3$,用于食物生产有关的水占

2017 年广州市用水总量的 18.8%;在能源和食物代谢网络间,二者产生关联的节点有农业种植节点、畜牧养殖节点和食品加工节点,2017 年由能源网络流入食物代谢网络的总能量为 $33.75 \times 10^4 \text{ tce}$;在水代谢网络和能源代谢网络间,水和能源关关节点有火力发电、

表2 图1中符号所表示的含义

符号	含义	符号	含义
W1	农业种植节点从环境取水	WA ₃	农村居民生活流入废水收集环节的污水
W2	畜牧养殖节点从环境取水	WA ₄	其他部门流入废水收集环节的废水
W3	水生产供应节点从环境取水	WA ₂	城镇居民生活节点流入废水收集节点的污水量
W4	其他部门从环境取水	WA ₅	由废水收集节点进入污水处理节点的水量
W5	石油加工炼焦节点从环境取水	WP ₁	农业种植节点的排入环境的水量
W6	电力、热力生产节点从环境取水	WP ₂	废水收集节点向环境损失的水量
W7	城镇居民生活节点从环境取水	WP ₃	废水处理节点向环境排放的处理过的水量
W8	农村居民生活节点从环境取水	WP ₄	石油加工、炼焦部门向环境排水量
WS ₁	水的生产供应节点流入食品加工节点水量	WP ₅	农村居民生活污水流入环境中的量
WS ₂	水的生产供应节点向城镇居民生活节点供水量	WP ₆	电力、热力生产节点向环境排水量
WS ₃	水生产供应节点向其他部门供水量	WP ₇	城镇居民生活污水排入环境中的量
WS ₄	水的生产供应节点向农村居民生活节点供水量	WP ₈	畜牧养殖节点排入环境的污水量
WA ₁	食品加工节点流向废水收集节点的废水	E _o	由外地调入本区域的石油
E _{o1}	外地调入的石油产品	E _g	从外地调入的天然气
E _{o2}	流入石油加工、炼焦节点的原油量	E _{g3}	流入乡村居民生活节点的天然气
E _{o3}	本地石油加工、炼焦节点生产的石油产品的量	E _c	外地调入的电力
E _{o4}	流入火力发电节点的石油产品	E _{e1}	本地火力发电节点生产的(火电)电力
E _{o5}	流入农业种植节点的石油产品	E _{e2}	本地水力发电节点生产的电力
E _{o6}	流入畜牧养殖节点的石油产品	E _{e3}	流入石油加工、炼焦节点的电力
E _{o7}	流入食品加工节点的石油产品	E _{e4}	流入火力发电节点的电力
E _{o8}	流入城镇居民生活节点的石油产品	E _{e5}	进入农业种植节点的电力
E _{o9}	流入乡村居民生活节点的石油产品	E _{e6}	进入畜牧养殖节点的电力
E _{o10}	流入水的生产供应节点的石油产品	E _{e7}	食品加工生产部门消费的电力
E _{o11}	流入废水处理节点的石油产品	E _{e8}	流入城镇居民生活节点的电力
E _c	从外地调入的煤炭	E _{e9}	流入农村居民生活节点的电力
E _{c1}	流入石油加工、炼焦节点的煤炭	E _{e10}	流入水生产供应节点的电力
E _{c2}	流入火力发电节点的煤炭	E _{e11}	流入废水处理节点的电力
E _{c3}	流入其他部门的煤炭	E _{g2}	流入城镇居民生活节点的天然气

石油加工、废水处理和水的生产供应节点,2017年由水代谢网络流入能源网络的总水量为 $22.91 \times 10^8 \text{ m}^3$,用于能源加工生产有关的水的量占2017年广州市总用水量的35%,由能源代谢网络流入水资源网络的总能量为 $21.27 \times 10^4 \text{ tce}$ 。

2.2 水-能源关联 水、能源子系统间关联较为紧密,在能源开采、加工转换阶段均有水的参与。在广州市,火力发电、石油加工等能源加工转换节点是与能源相关用水的主力,其中火力发电量和火力发电用水量变化关系如图2-a所示,进入石油炼化加工节点的水和原油加工生产情况如图2-b所示。

从图2-a可知,进入火力发电节点的水和能源系统的火力发电量有相同变化趋势,都呈先减少、后增

加趋势,且耦合度为0.91,反映了能源与水之间的相关性。2013—2017年,发电量先由 $391.5 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 下降到 $337.9 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,而后又恢复到 $382.8 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$;取水量则由 $24.33 \times 10^8 \text{ m}^3$ 下降到 $22.1 \times 10^8 \text{ m}^3$,再增长到 $22.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。这与广州市2013年出台实行的“最严格水管理制度”有密切关系。整改完成后电力生产得到恢复,取水量也随之增加,但生产电力的用水效率得到改善,每生产 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 电力的取水量由 0.062 m^3 减少到 0.060 m^3 。可以看出,电力生产情况改变取水量。水力发电到热电厂冷却和其他过程,乃至燃料开采和处理,几乎所有能源生产过程都需要耗用大量水资源。反过来讲,水行业也需要能源(主要为电力)来抽水、处理水和输水,因此,水资源的变化也会影响

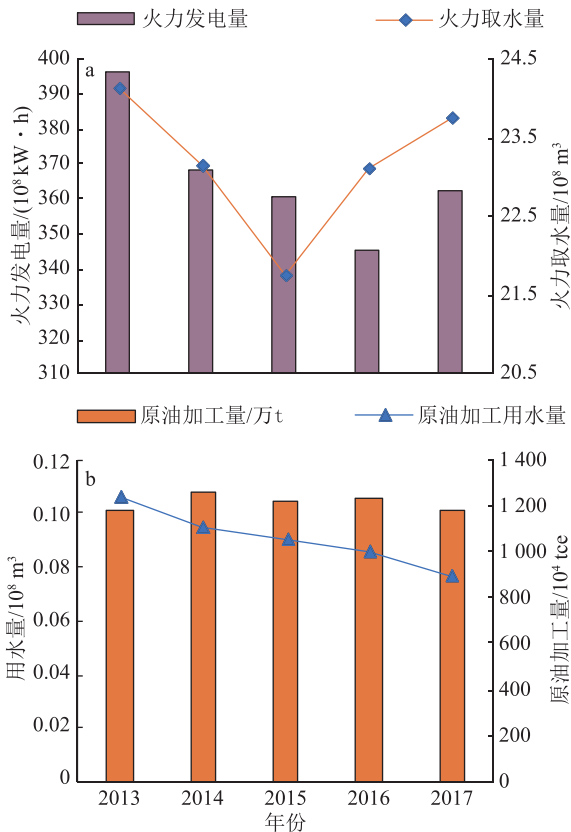


图 2 火力发电量和原油加工量与取水量的情况

能源生产的情况。由图 2-b 可知, 2013—2017 年, 石油炼化加工节点原油加工量有所波动, 但总体保持稳定, 基本在 $(1171.63 \sim 1260.2) \times 10^4$ tce 之间。进入原油加工节点的水量逐渐减少, 总水量由 0.11×10^8 m³ 减少到 0.08×10^8 m³。2011—2015 年为“十二五”规划期间, 加大环境保护力度, 为此广州市积极推动环境保护政策, 颁布了广州市“十二五”时期环境保护规划。其中, 主要任务、规划目标和主要措施都针对资源消耗做出了严格的要求。综合来看, 由于近年来广州市严格的环保政策, 使得原油加工等高耗能高污染行业发展受到一定限制, 而广州市石油消费需求连年增长^[9], 在政策限制和需求增长刺激下, 原油加工生产基本保持稳定。在另一方面, 由于 2014 年取水定额制度的实行, 促使原油加工行业的用水效率提高 (2013 年取水效率为 $0.94 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$, 2014 年取水效率为 $0.71 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ 和 2017 年取水效率为 $0.65 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)。由此可看出减少污染和水耗的途径不仅仅是限制生产, 更要从多系统角度的管理来收获更大效益。

2.3 水-食物关联 水和食物之间的相互联系涉及食物从生产到工厂加工, 再到居民生活消费, 如农业种植环节用水、畜禽养殖用水、食物在经过食物加工企业加工用水等。农业种植环节的用水贯穿植物生长整个环节, 如图 3-a 是农业种植环节用水量和农业种

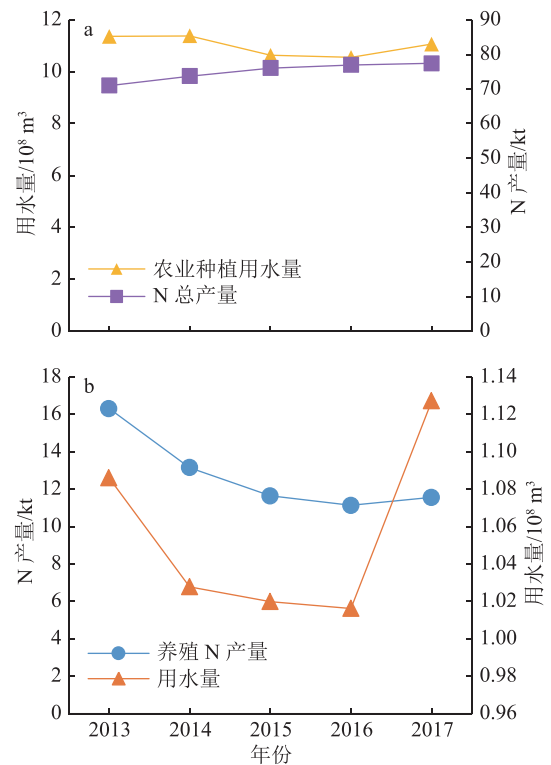


图 3 农业种植和畜牧养殖与用水量的情况

植环节 N 总产量与用水量变化关系。畜牧养殖节点是畜禽类食物的主要来源, 各类畜禽在养殖过程均需水参与, 如畜禽饮水、冲洗用水等, 其生产产出量和用水量关系如图 3-b 所示。

由图 3-a 可知二者变化趋势基本一致, 产量增加用水量有所增加, 且耦合度为 0.99, 可见水和食物 N 产出存在相关性。各类作物种植期间需水量不同, 所以农业种植用水量还受种植作物种类和种植面积影响。广州市主要农业种植面积是减少的, 尤其是 2014—2017 年水稻等需水量较高的作物种植面积减少最多, 减少了 24 009 hm²。这与农业种植用水量下降趋势较为一致。由图 3-b 可知, 2013—2017 年, 畜禽养殖节点的产出量和用水量变化趋势基本一致, N 产量下降用水量也随之下降, 且耦合度为 0.99, 可看出畜禽养殖节点的产出和水耗有很好的相关性。

2.4 能源-食物关联 能源和食物系统间的关联节点为农业种植节点、食物加工节点等。农业种植节点不只是有水的参与, 同时还需要消耗能源, 在种植、收获等阶段都要消耗能源, 其能耗和作物种植种类有关, 因为不同作物种植过程中的能源消耗强度不同。农业种植环节产出和能源消耗量情况如图 4-a。当作物收获后, 进入食物加工生产企业, 该环节的能源消耗情况与食物加工种类及具体加工过程有关。图 4-b 是食物加工环节的食物产出量和能源消耗量的情况。

由图 4-a 可知: 2013—2017 年, 广州市农业种植

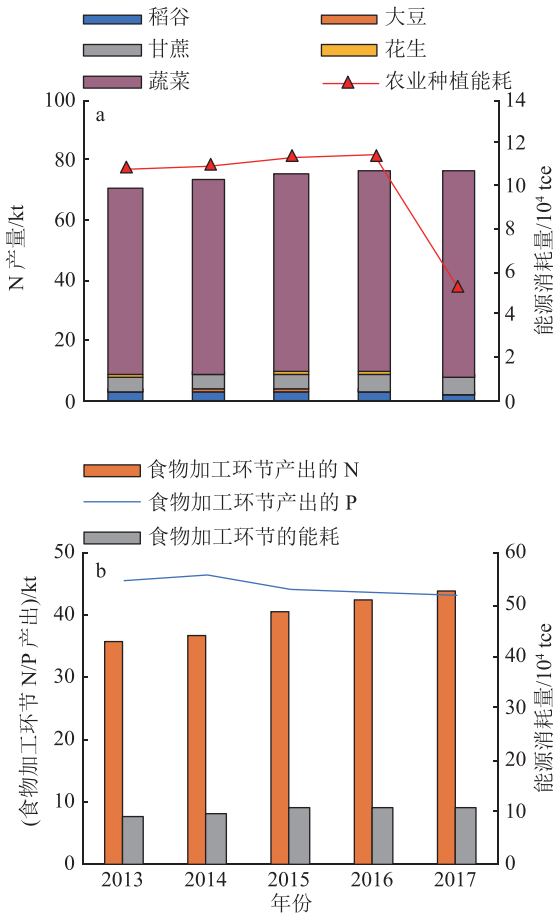


图 4 产出与能源消耗情况

节点的食物 N 产出量总体缓慢增长, 5 年间由 70973.1 t 增长到 77383.0 t; 而能源消耗量在 2013—2016 年有小幅增加, 2017 年下降较为明显. 其主要是由于农业种植能耗与作物种类种植面积有关. 具体来看, 水稻、大豆、花生等能源较为密集型的作物 N 产量在 2013—2016 年保持相对稳定, 但在 2017 年都突然下降(2013—2016—2017 年各作物产量变化趋势: 水稻 N 产量 3339.9→3302.2→2119.8t, 大豆 N 产量 340→334→166.3 t, 花生 N 产量 756→753→676 t), 这与农业种植节点的能源消耗变化情况一致. 且种植面积也能反映这一情况. 2013—2017 年, 前 4 年广州市总种植面积及各类作物种植面积基本稳定, 而在第 5 年总种植面积骤减了 17000 hm². 具体来看, 水稻种植面积减少了 21000 hm², 大豆面积减少 730 hm², 花生面积减少 700 hm², 由于 3 类作物在种植期间都要消耗大量能源, 因此农业种植节点能源消耗在第 5 年发生突降, 且 N 产量与能源消耗的耦合度为 0.84. 由此可见, 农业种植节点消耗的能源和食物生产间是存在关联性的. 由图 4-b 可知, 进入广州食物加工节点的 N 和 P 的量是逐年增加的, 即产生的各类食物总量是增加的, 这是食物需求增长带来的必然结果. 同时看

到, 食物加工的能源消费总量有小幅下降, 总能耗由 54.8×10⁴ tce 下降至 51.9×10⁴ tce. 这主要是由于食物加工企业受广州市出台的政策影响, 要求减少企业、居民等燃烧散煤, 煤改电或改气, 将煤主要用于发电. 2013—2017 年食品加工环节的直接煤炭消费减少近 6×10⁴ tce, 电力消耗增长 3×10⁴ tce, 同时淘汰落后生产企业, 提高了食品加工过程的能源利用效率.

2.5 FEW 系统关联性 FEW 系统在各子系统以及各节点的协同作用下朝着某个方向发展, 为了解系统的总体发展情况, 本文建立了城市 FEW 系统关联性的评价指标体系.

由图 5 可以看出, 2013—2017 年, 广州市 FEW 系统综合评价指数中, 在资源消耗方面是趋于恶化的, 主要是由于社会经济发展和人口的增长导致资源消耗需求量增加. 从资源消耗强度和效益方面可以看到, 资源利用效率在 2013—2014 年呈下降的趋势, 从 2015 年后开始改善, 主要是制定实行水资源、能源管理政策如“最严格取水定额管理制度”. 在环境影响方面, 环境综合评价指数是下降的, 这说明了 FEW 系统对环境的影响是逐渐加强的, 主要是由于随着城市发展系统产生的废弃物量大幅增加, 如生活垃圾、污水等, 而目前广州市对废弃物的处理方式较为简单, 生活垃圾大部分通过填埋处理, 虽未直接丢弃, 但大量废弃物进入非耕地土壤造成了环境压力, 同时还占用大量土地. 资源自给呈下降的水平, 广州市本地无煤炭、石油等资源矿藏, 绝大部分的能源需求都需要从其他地区调入, 超过 95% 的能源依赖外地供给; 另一方面, 城市化水平提高、耕地面积减少, 使得粮食自给也逐渐减少, 近年来本地食物自给率不足 3 成. 在本地资源供给不足、资源需求总量连年增长的情况下, 使得资源自给逐渐下降. 在系统相关性方面, 综合评价指数逐渐增大, 反映了 FEW 综合系统内各子系统间的依存性和相互作用是逐渐加强的, 主要是由于社会经济高度发展, 各类资源及人口在城市空间

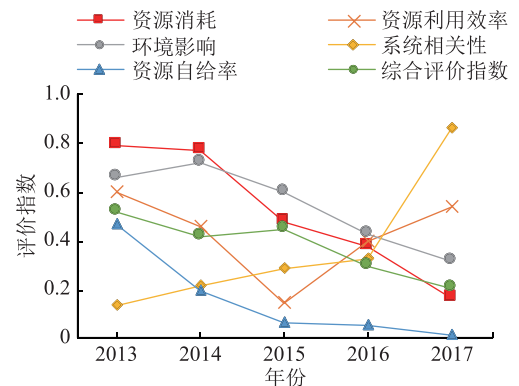


图 5 广州市 FEW 系统评价指标

内高度聚集,城市各部门间联系越来越紧密,使得 FEW 各部分间的关联更为复杂.综合评价指数逐渐降低,说明广州市 FEW 综合系统发展变差,主要是由于输出环境的废弃物逐年增多、资源需求量逐渐增加,以及资源对外依赖度逐年提高,导致广州市 3 类资源可持续发展性不良.

综上分析,2013—2017 年,广州市 FEW 系统、资源消耗水平逐渐增加,资源自给率水平逐渐降低,资源利用效率及效益先下降后增加,对环境影响也呈加强趋势,各子系统间的依存度和关联逐渐加强.因此,为改善上述存在的问题,在未来发展中:应大力开发本地资源,如太阳能、风能等;对废弃物进行资源化回收利用,如粪便等的资源化利用,可以在降低环境压力的同时提高资源重复利用率,从而减少对外资源依赖度.从系统总体性来看,制定管理政策时应从多系统协同角度出发,可以得到更好收益,同时可以发现对其他方面可能产生的不利影响,以便更好地权衡各方面的利益关系.

3 结论

通过上述研究得出以下结论:

1)广州市在 2013—2017 年期间,能源输入总量由 5380.0×10^4 tce 增加到 6234.0×10^4 tce,增长约 15.9%; N 输入总量由 73 081.0 t 增加到 105 520.3 t,增长约 44.4%.

2)通过识别分析广州市 FEW 代谢网络,发现 3 个网络中产生直接关联的火力发电、石油加工炼化、水的生产供应、废水处理、农业种植、畜牧养殖和食物加工等 7 个节点.2017 年广州市由水资源系统流入食物子系统的水量为 12.19×10^8 m³,流入能源系统的水量为 22.91×10^8 m³,由能源系统流入食物系统的能源总量为 11.36×10^4 tce,由能源系统流入水资源系统的能源总量为 21.27×10^4 tce.

3)由基于本文构建的综合网络指标评价体系可知:广州市资源消耗指数逐渐恶化,其数值由 0.79 减少到 0.16;资源自给率指数逐渐减小,其数值由 0.47 降低到 0.20;资源利用率先减小后增大,其中 2015 年数值最小(0.5);环境影响大体呈加强趋势,而系统相关性逐渐增强,数值由 0.13 增加到 0.86,说明各子系统间的依存度增加.在未来资源的管理工作中,应更多地改善资源利用水平,从系统关联性方面入手,充分考虑资源间的相关性和相互影响,更有利于各资源的可持续发展.

4 参考文献

- [1] KARABULUT A, EGOH B N, LANZANOVA D, et al. Mapping water provisioning services to support the ecosystem-water-food-energy nexus in the Danube River basin[J]. *Ecosystem Services*, 2016, 17: 278
- [2] Co-optimizing solutions water and energy for food, feed and fiber[R]. Switzerland: World Business Council for Sustainable, 2014
- [3] The United Nations world water development report 2015: water for a sustainable world[R]. Paris: United Nations World Water Assessment Programme, 2016
- [4] United States National Intelligence Council. Global trends 2030: alternative worlds[R]. United States, [S.l.]: Nuclear Industry Council, 2012
- [5] BAZILIAN M, ROGNER H, HOWELLS M, et al. Considering the energy, water and food nexus: towards an integrated modelling approach[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(12): 7896
- [6] ALBRECHT T R, CROOTOFF A, SCOTT C A. The water-energy-food nexus: a systematic review of methods for nexus assessment[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(4): 043002
- [7] MEADOWS D H, MEADOWS D L, RANDERS J, et al. The limits to growth: a report for the club of Rome's project on the predicament of mankind[M]. New York: Universe Books, 1972
- [8] ALLAN J A. Virtual water - the water, food, and trade nexus. useful concept or misleading metaphor?[J]. *Water International*, 2003, 28(1): 106
- [9] TANIGUCHI M. Optimizing the water-energy-food nexus in the Asia-Pacific ring of fire[C]. Kyoto: Wiley, 2013, 94: 435-435
- [10] ENDO A, TSURITA I, BURNETT K, et al. A review of the current state of research on the water, energy, and food nexus[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2017, 11: 20
- [11] KADDOURA S, EL KHATIB S. Review of water-energy-food nexus tools to improve the nexus modelling approach for integrated policy making[J]. *Environmental Science & Policy*, 2017, 77: 114
- [12] MANNAN M, AL-ANSARI T, MACKAY H R, et al. Quantifying the energy, water and food nexus: a review of the latest developments based on life-cycle assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 193: 300
- [13] DAS T, CABEZAS H. Tools and concepts for environmental sustainability in the food-energy-water nexus: chemical engineering perspective[J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2018, 37(1): 73
- [14] GONZÁLEZ-BRAVO R, SAUCEDA-VALENZUELA M, MAHLKNECHT J, et al. Optimization of water grid at macroscopic level analyzing water-energy-food nexus[J].
- [1] KARABULUT A, EGOH B N, LANZANOVA D, et al.

- ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(9): 12140
- [15] BERGENDAHL J A, SARKIS J, TIMKO M T. Transdisciplinarity and the food energy and water nexus: Ecological modernization and supply chain sustainability perspectives[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 133: 309
- [16] ZHANG P P, ZHANG L X, CHANG Y, et al. Food-energy-water (FEW) nexus for urban sustainability: a comprehensive review[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 142: 215
- [17] MOIOLI E, SALVATI F, CHIESA M, et al. Analysis of the current world biofuel production under a water-food-energy nexus perspective[J]. Advances in Water Resources, 2018, 121: 22
- [18] EL-GAFY I. Water-food-energy nexus index: analysis of water-energy-food nexus of crop 's production system applying the indicators approach[J]. Applied Water Science, 2017, 7(6): 2857
- [19] 广州市石油燃气行业协会. 中国石油、天然气战略资源分析[EB/OL]. (2014-10-09)[2021-04-24]. <http://www.gzpia.org.cn/newsnr.asp?id=1128>

Urban food-energy-water nexus in Guangzhou

GAO Chengkang¹⁾ ZHU Sulong^{1)†} ZHANG Shuaibing²⁾ YU Meng¹⁾
MENG Xiangyu¹⁾ LI Xiaojun³⁾

(1)State Environmental Protection Key Laboratory of Eco-Industry, Northeastern University, 110819, Shenyang, Liaoning, China;

2)Geely Automobile Research Institute, 315336, Ningbo, Zhejiang, China;

3)Key laboratory of pollution ecology and environment engineering, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Science, 110016, Shenyang, Liaoning, China)

Abstract The food-energy-water (FEW) nexus is fundamental for human survival. The 2011 World Economic Forum (WEF) listed “FEW risk clusters” for the first time as a set of three important risks that will affect global landscape in the next decade. Here an analytical method based on material and energy flows was used to identify nodes and paths in the three metabolic networks. Association between FEWs and related indicators were analyzed according to identified nodes and pathways. Total water consumption related to food production in Guangzhou in 2017 was found to be $12.19 \times 10^8 \text{ m}^3$, energy-related water consumption was $22.91 \times 10^8 \text{ m}^3$, energy consumption related to food production was $11.36 \times 10^4 \text{ tce}$, and energy consumption related to water was $21.27 \times 10^4 \text{ tce}$. It was found that resource consumption in Guangzhou gradually increased, resource index rapidly deteriorated, the level of resource self-sufficiency gradually decreased, impact on the environment showed a strengthening trend, the dependence and nexus between subsystems gradually strengthened.

Keywords material flow; energy flow; food-energy-water nexus; Guangzhou; evaluation indicators

【责任编辑:武佳】