

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.06.001

广东省城市尺度水、能源、粮食足迹核算及效率评估

谭倩,毛文俊

(广东工业大学生态环境与资源学院,广东 广州 510006)

摘要:为全面评估资源利用效率,提出了一个结合多区域投入产出分析和数据包络分析的效率评估框架,核算了广东省城市尺度的消费侧水、能源和粮食足迹,并在此基础上从水-能源-粮食系统的角度评估了区域间贸易影响下的投入产出效率。结果表明:各城市的消费侧水、能源和粮食足迹以省外地区流入为主,其次是本地消费足迹,而省内其他城市输入的贸易隐含资源占比相对较小;水-能源-粮食系统效率与消费侧水、能源和粮食足迹的空间分布特征趋同,主要呈现由珠三角地区向外部递减的趋势;考虑区域间贸易对水、能源和粮食消费的影响下,大多数城市的效率得到改善,区域整体效率提高;各城市中,深圳和中山达到了最优的投入产出配置,其余城市具有不同的投入冗余量,广州具有最大的资源节约潜力。

关键词:水-能源-粮食系统;多区域投入产出分析;数据包络分析;环境足迹;投入产出效率

中图分类号:TV214

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2025)06-0001-11

Urban water-energy-food footprint accounting and efficiency assessment in Guangdong Province

TAN Qian, MAO Wenjun

(School of Ecology, Environment and Resources, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: To conduct a comprehensive evaluation of resource utilization efficiency, an efficiency assessment framework that combined multi-regional input-output analysis and data envelopment analysis was proposed. This framework was employed to calculate the water, energy, and food footprints on the consumption side of cities in Guangdong Province. On this basis, input-output efficiency under the influence of inter-regional trade was assessed from the perspective of the water-energy-food system. The findings indicate that the cities' water, energy, and food footprints on the consumption side are predominantly influenced by inflows from regions outside the province, followed by local consumption footprints. Other cities within the province receive a relatively negligible proportion of trade-implied resources. The spatial distribution characteristics of the water-energy-food system efficiency and the water, energy, and food footprints on the consumption side converge, primarily exhibiting a decreasing trend from the The Pearl River Delta region to the exterior. By taking into account the impact of inter-regional trade on water, energy, and food consumption, the efficiency of most cities has been improved, and the overall efficiency of the region has increased. Among the cities, Shenzhen and Zhongshan have demonstrated optimal input-output allocation, while the remaining cities have exhibited varying degrees of input redundancy, with Guangzhou exhibiting the greatest potential for resource savings.

Key words: water-energy-food system; multi-regional input-output analysis; data envelopment analysis; environmental footprint; input-output efficiency

水、能源和粮食是支撑城市经济社会发展的 3 种战略性资源^[1-2]。随着城市化推进和人口不断增长,城市范围内 3 种资源的供需矛盾日益凸显^[3-4]。为了满足日益增长的消费需求,一座城市供应的商品和服务通常由其他地区提供^[5]。在此背景下,贸易活动导致隐含在商品中的 3 种资源在不同城市间流动,模糊了城市真实资源消耗边界,致使决策者难以全面评估资源利用效率^[6-7]。与此同时,伴随城市发展驱动的高强度资源消耗,水、能源、粮食 3 种资源的安全和可持续面临着严峻挑战,提升资源投入-经济产出效率是缓解此类困境的有效途径^[8]。因此,在理清贸易隐含资源流动的基础上,评估并提升城市水-能源-粮食系统投入产出

基金项目:国家自然科学基金杰出青年科学基金项目(52125902)

作者简介:谭倩(1981—),女,教授,博士,主要从事水、能源、食品纽带关系研究。E-mail:qian_tan@gdut.edu.cn

引用本文:谭倩,毛文俊.广东省城市尺度水、能源、粮食足迹核算及效率评估[J].河海大学学报(自然科学版),2025,53(6):1-11.

TAN Qian, MAO Wenjun. Urban water-energy-food footprint accounting and efficiency assessment in Guangdong Province[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(6): 1-11.

效率具有重要意义。

贸易隐含资源流是指隐含在商品或服务中的资源要素(如水、能源等)通过贸易形成的跨区域流动现象^[9-10]。其核心在于,这些资源并非直接作为商品进行交易,而是在商品生产过程中被间接消耗,并随着最终产品的流通被转移到消费端^[11]。研究方法上,多区域投入产出(multi-regional input-output, MRIO)分析是常用的方法。MRIO分析通过构建跨区域经济网络,能够系统追踪不同地区间行业的经济流动关系,为评估最终需求引发的经济影响提供建模基础^[12-13]。在MRIO分析的基础上,通过将水资源、能源等环境账户数据嵌入跨区域供应链网络,能够从终端需求视角揭示消费行为通过供应链驱动全生命周期的资源消耗,同时系统追踪经济活动在空间维度上的贸易隐含资源流动^[14-16]。在消费侧核算下,水足迹(能源足迹)通常是指地区消费行为通过供应链驱动全生命周期直接和间接的水资源(能源)消耗的总和,包括本地生产的水资源(能源)消耗和输入的贸易隐含水(能源)^[17-18]。鉴于模型的优点,目前被广泛应用于研究虚拟水^[19]、隐含能源^[20-22]、隐含碳^[23-25]的转移。此外,在研究尺度上,由于数据获取问题,现有研究主要聚焦于国家级和省级尺度,城市尺度的研究则相对较少,尤其是对于地级市的研究^[14,16,26]。为了提供城市尺度的决策信息,部分学者也进行了积极探索,尝试将省级投入产出表中的数据分解到各城市,从而编制城市尺度的多区域投入产出表^[5,27-28]。城市尺度的信息对于地方政府的决策可能比来自国家尺度或省级尺度的汇总信息更有意义。

在理清贸易隐含资源流动的基础上,通过评估投入产出效率,能够明晰资源利用现状,进而通过相应的政策激励弥补不足,改善资源利用。研究方法上,数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)广泛用于评估投入产出效率^[29]。DEA是一种基于数学规划的非参数效率评价方法,其核心优势在于无需预先设定变量间的函数关系或主观赋权,通过构建决策单元的生产前沿面客观评估相对有效性^[30]。目前,学者们使用这种方法对不同尺度的水-能源-粮食系统效率开展了一系列研究。例如,在国家尺度,Ibrahim等^[31]使用DEA评估了经济合作与发展组织国家的水-能源-粮食-土地关联系统效率。在省级尺度,Huang等^[32]剔除了外部环境的异质性影响,基于三阶段DEA揭示了中国省级水-能源-粮食纽带系统的真实效率。在城市尺度,Zhang等^[33]使用DEA量化了2011—2020年黄河流域94个城市的水、能源、粮食耦合效率。现有研究提供了重要的理论基础,但在资源投入指标上主要聚焦直接资源消耗,较少考虑贸易隐含资源流动对区域资源消费的影响。事实上,在消费侧核算下,一个地区实际消耗的资源不仅包括生产本地使用的商品和服务产生的资源消耗,还包括输入的贸易隐含资源^[33]。因此,有必要将贸易隐含资源纳入效率评估框架,以更为全面地评估资源利用效率。

针对现有研究存在的不足,本文以广东省为研究区,编制城市尺度多区域投入产出表,结合环境账户数据构建环境拓展的多区域投入产出模型,在此基础上核算消费侧水、能源和粮食足迹,揭示区域间贸易隐含水、能源和粮食流动。以核算的消费侧水、能源和粮食足迹作为投入,同时以各城市的增加值作为产出,采用DEA中的松弛变量测度(slacks-based measure, SBM)模型评估各城市的水-能源-粮食系统效率,识别投入产出配置不合理的区域,揭示它们的资源节约潜力,以期评估贸易隐含资源流动下水-能源-粮食系统投入产出效率提供科学依据和技术手段。

1 研究区概况

广东省位于中国大陆最南端,经济高度发达,地区生产总值连续35年居全国首位,并于2023年成为首个突破13万亿元的省份。在空间上,广东省由21个地级市组成,包括珠三角的9个城市(广州、深圳、珠海、佛山、江门、肇庆、惠州、东莞、中山),粤北山区的5个城市(韶关、清远、云浮、梅州、河源),粤东地区的4个城市(汕头、汕尾、潮州、揭阳)和粤西地区的3个城市(湛江、茂名、阳江)。

伴随着经济社会的快速发展,广东省在水、能源和粮食方面面临着一系列挑战:①水资源空间分布不均,能源和粮食自给率低等^[32];②广东省长期保障港澳地区的水、能源和粮食供应,进一步加剧了自身的供需失衡困境^[34]。在此背景下,广东省水、能源、粮食3种资源的安全和可持续面临着严峻挑战,提升资源投入-经济产出效率是缓解此类困境的有效途径。作为中国经济活力最强的省份之一,广东省城市间、广东省与外省贸易联系频繁,由此带来大量贸易隐含水、能源和粮食的转移,聚焦直接资源消耗难以全面反映水-能源-粮食系统投入产出效率。因此,本文以广东省为研究区,通过构建广东省城市尺度多区域投入产出模型,核算消费侧水、能源和粮食足迹,量化贸易隐含资源转移,同时以消费侧足迹作为资源投入评估水-能源-粮食系

统投入产出效率,从而更好地了解资源利用现状。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 研究方法

图 1 为本文研究的技术路线。由于缺乏广东省城市尺度多区域投入产出表,本文首先结合区位熵模型和贸易引力模型^[35]编制广东省城市尺度多区域投入产出表。为了进一步理清外省与广东省各城市的经济联系,将编制的广东省城市尺度多区域投入产出表链接到中国省级多区域投入产出表中,从而得到广东省 21 个城市和全国 30 个省区市的多区域投入产出表。随后,基于统计年鉴数据核算了 51 个区域的实体水、能源和粮食消耗,将其作为投入产出表的环境账户数据,构建环境拓展的多区域投入产出模型,分别核算了广东省各城市的消费侧水、能源和粮食足迹,揭示了区域间的贸易隐含资源流动。在消费侧足迹核算的基础上,分别以水、能源和粮食足迹作为投入,同时以增加值作为产出,基于 DEA-SBM 模型评估贸易影响下各城市的水-能源-粮食系统效率,识别投入产出配置不合理的区域,并揭示它们的资源节约潜力。

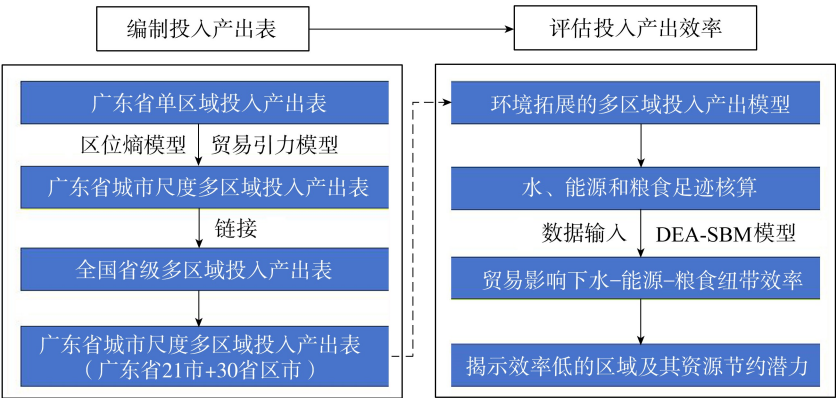


图 1 技术路线

Fig.1 Technology roadmap

2.1.1 广东省城市尺度多区域投入产出表编制

基于省级投入产出表,结合区位熵模型^[36]、贸易引力模型^[37-40]以及相关分解技术,构建城市尺度投入产出表。利用城市间的经济规模和距离信息,采用贸易引力模型估算两城市间的贸易量,作为贸易分配的基础:

T_{rs} = kQ_r^{\alpha}Q_s^{\beta}/D_{rs}^{\gamma} \tag{1}

式中: T_{rs} 为城市 r 与城市 s 的贸易量; Q_r 、 Q_s 分别为城市 r 和城市 s 的经济规模(如 GDP、人口、零售额、进出口总额等的综合指标); D_{rs} 为城市 r 与城市 s 间的距离; k 、 α 、 β 、 γ 为待定系数。

基于式(1)可得贸易方向系数 θ_{rs} :

\theta_{rs} = T_{rs} / \sum_s T_{rs} \tag{2}

基于式(1)(2)可得方向性贸易流为

T_{rs}^* = \theta_{rs} T_{rs} \tag{3}

则城市间的贸易系数 m_{rs} 为

m_{rs} = T_{rs}^* / \sum_s T_{rs}^* \tag{4}

m_{rs} 为分解省级中间投入和最终需求的重要权重,具体的贸易分配方法遵循文献[41]的框架。由于无法直接获取城市尺度投入产出表,本文采用区位熵方法对省级行业结构进行城市尺度分解:

L_{ri} = \frac{G_{ri}/G_r}{G_{pi}/G_p} \tag{5}

式中: L_{ri} 为城市 r 的行业 i 的区位熵; G_{ri} 、 G_r 分别为城市 r 的行业 i 、全部行业的 GDP; G_{pi} 、 G_p 为全省的行业 i 及全部行业的 GDP。基于区位熵对省级技术系数进行城市化修正^[35]:

a_{ij,r}^* = a_{ij,p} f(L_{ri}) \tag{6}

式中: $a_{ij,r}^*$ 为修正后城市 r 的行业 i 到行业 j 的投入系数; $a_{ij,p}$ 为省级行业 i 到行业 j 的投入系数; $f(L_{ri})$ 为对省级投入系数的修正函数。

基于式(4)(6)可得城市 r 行业 i 对城市 s 行业 j 的中间投入 $Z_{ij,rs}$:

$$Z_{ij,rs} = m_{rs} a_{ij,r}^* X_r \quad (7)$$

最终消费亦按贸易系数进行空间分配:

$$F_{j,rs} = m_{rs} F_{j,p} \quad (8)$$

式中: X_r 为城市 r 的总投入; $F_{j,p}$ 为省级最终消费; $F_{j,rs}$ 为城市 r 对城市 s 行业 j 的最终消费分配量。

总投入、最终消费、进口和出口的城市尺度分解采用行业增加值结构法^[35]。采用双比例平衡法(RAS)使城市尺度 MRIO 在行列和上达到新的平衡。随后,参考 Zheng 等^[27]的研究,将广东省城市尺度多区域投入产出表链接至中国省级多区域投入产出表,形成包含广东省 21 个城市与全国 30 个省区市的完整多区域投入产出系统,用于后续环境拓展核算与效率测度。

2.1.2 环境拓展的多区域投入产出模型构建

为了在多区域投入产出框架下核算水、能源和粮食足迹,本文基于城市尺度 MRIO 表,对其进行环境拓展。整体流程遵循主流 MRIO 环境核算方法^[27,42-44],包括行业环境强度计算、环境流量的空间分配和城市尺度环境足迹核算 3 个步骤。

a. 行业环境强度计算。基于统计年鉴和相关环境数据库获取水资源消耗量、能源消耗量和粮食消耗量等环境数据,并与城市尺度行业总产出进行匹配,得到行业环境强度^[45]:

$$e_{ri} = E_{ri}/O_{ri} \quad (9)$$

式中: e_{ri} 为城市 r 行业 i 的环境强度(例如单位产出用水量、能耗或粮食消耗); E_{ri} 为城市 r 行业 i 的环境资源消耗量; O_{ri} 为城市 r 行业 i 总产出。

b. 环境流量的空间分配。基于城市尺度行业环境强度,将其扩展至多区域投入产出框架,形成对角化环境强度矩阵:

$$B = \text{diag}(e_{11}, e_{12}, \dots, e_{ri}, \dots) \quad (10)$$

B 与 MRIO 表的行业维度保持一致,用于将经济流量转化为环境压力。

c. 城市尺度环境足迹核算。在投入产出分析框架中,环境足迹由环境强度、完全需求系数与最终需求共同决定。城市 r 的 3 类足迹(即水足迹、能源足迹与粮食足迹)可统一表示为:

$$F_r = B L y_r \quad (11)$$

其中

$$L = (I - A)^{-1}$$

式中: F_r 为城市 r 的行业足迹列向量(包括直接和间接足迹); L 为 Leontief 逆矩阵; A 为式(6)构建的城市尺度 MRIO 技术系数矩阵; y_r 为城市 r 的最终需求矩阵。

式(11)为环境拓展投入产出模型的核心,可同时核算 3 类足迹的空间流动与来源构成。利用 MRIO 跨区域属性,将足迹进一步分解为:

$$F_{rs} = B_r L_{rs} y_s \quad (12)$$

式中: F_{rs} 为城市 r 的最终需求在城市 s 的生产体系中造成的环境消耗; L_{rs} 为 Leontief 逆矩阵中城市 r 生产响应城市 s 需求的子块。该分解方法可用于分析城市间水、能源和粮食足迹的传递路径与贡献结构^[17]。

2.1.3 DEA-SBM 模型

DEA 可用于评估决策单元(decision making units, DMU)的相对效率。传统的 DEA 存在未考虑投入产出松弛的缺点,导致了效率偏差。为解决这一问题,Tone^[46]提出了基于 Pareto-Koopmans 经济理论的 DEA-SBM 模型。该模型引入了松弛变量,在测量效率时不必假设输入和输出在同一方向上变化,从而能更准确地评估 DMU 的相对效率,DEA-SBM 模型的基本形式参见文献[47]。

2.2 数据来源

广东省城市尺度多区域投入产出表的编制主要基于 2015 年广东省投入产出表,包括 42 个部门,本文参考 Huang 等^[42]的研究将 42 个部门划分为 7 大部门(表 1)。2015 年中国省级多区域投入产出表来自中国碳核算数据库。为了使能源和粮食消耗数据具有可比性,本文将各种能源类型转化为标准煤,将各种食品种类统一为原粮,标煤转化率以及原粮转化率分别参考中国能源统计年鉴和辛良杰等^[45]的研究。由于无法获

悉各行业的具 体水、能源和粮食消耗数据,本文依据中国经济普查年鉴中各行业的用水结构得到各省及各市内部各行业的用水数据,依据中国统计年鉴中各行业的能源消费结构得到各省及各市内部各行业的耗能数据,各省及各市内部各行业的粮食消耗数据则依据增加值的概率分布得出。

表 1 投入产出表的部门分类

Table 1 Sector classification of input-output table

合并部门	初始部门	合并部门	初始部门
电力、热力、燃气的生产和供应业(2)	电力、热力的生产和供应	农林渔牧业(1)	农林渔牧产品和服务
	燃气生产和供应		煤炭采选产品
制造业(19)	食品和烟草	矿业(4)	石油和天然气开采产品
	纺织品		金属矿采选产品
	纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品		非金属矿和其他矿采选产品
	木材加工品和家具	水的生产和供应业(1)	水的生产和供应
	造纸印刷和文教体育用品	建筑业(1)	建筑业
	石油、炼焦产品和核燃料加工品	运输和服务业(14)	批发和零售
	化学产品		交通运输、仓储和邮政
	非金属矿物制品		住宿和餐饮
	金属冶炼和压延加工品		信息传输、软件和信息技术服务
	金属制品		金融
	通用设备		房地产
	专用设备		租赁和商务服务
	交通运输设备		科学研究和技术服务
	电气机械和器材		水利、环境和公共设施管理
	通信设备、计算机和其他电子设备		居民服务、修理和其他服务
	仪器仪表		教育
	其他制造产品		卫生和社会工作
	废品废料		文化、体育和娱乐
	金属制品、机械和设备修理服务		公共管理、社会保障和社会组织

注:合并部门后括号中的数字为部门数量。

3 结果与分析

3.1 广东省各城市水、能源、粮食足迹来源

由图 2 可知,广州、深圳、佛山和东莞的水、能源和粮食足迹居于广东省前列,这些城市均位于珠三角地区。相比之下,潮州、河源、云浮和汕尾的水、能源和粮食足迹则相对较少,这些城市主要位于粤东地区和粤北山区。这一结果可能与经济发达的城市通常伴随着高强度的资源消耗有关。按照水、能源和粮食足迹的来源将其划分为省外地区流入、省内其他城市流入以及本地足迹三部分,其中省外地区流入和省内其他城市流入为该城市输入的贸易隐含资源总和。总体上看,广东省各城市水、能源和粮食足迹以省外地区流入为主,平均占比分别为 52%、67%、49%;其次是本地足迹,平均占比分别为 33%、14%、34%。相比之下,省内其他城市流入的水、能源和粮食足迹占比较小。

深圳和珠海与其他城市不同,它们足迹量的省内其他城市流入占比仅次于省外地区流入,说明这 2 座城市对广东省其他城市的资源依赖性相对较高,这可能与深圳和珠海的经济发展水平密切相关。作为经济特区和粤港澳大湾区的核心城市,深圳和珠海的经济活动高度依赖资源输入。同时,由于其地理位置邻近港澳地区,深圳和珠海常作为第三方将大量的商品和服务外包给广东省的其他城市。这种经济结构和区域分工模式进一步加剧了其对省内资源的依赖性。部分学者也得出了类似的结果,例如,Liu 等^[35]基于城市尺度多区域投入产出模型探讨了珠三角城市群的水-能关系,发现深圳在水资源和能源方面主要依赖珠三角城市群中的其他城市。

3.2 广东省各城市通过行业输入的水、能源和粮食足迹

由图 3(a)可知,在区域消费侧水足迹构成中,农林渔牧业占据主导地位,平均占比达 76%。分城市看,广州、深圳、佛山和东莞的农林渔牧业水足迹贡献尤为显著,其占比明显高于其他城市。这种现象的形成机制可归结于 2 个层面:①农产品作为典型的水资源密集型商品,其生产链条涉及大量灌溉用水消耗;②广东省耕地资源禀赋有限(2023 年人均耕地仅 153.3 m²),需依托跨区域贸易保障农产品供给,这种外部补给模

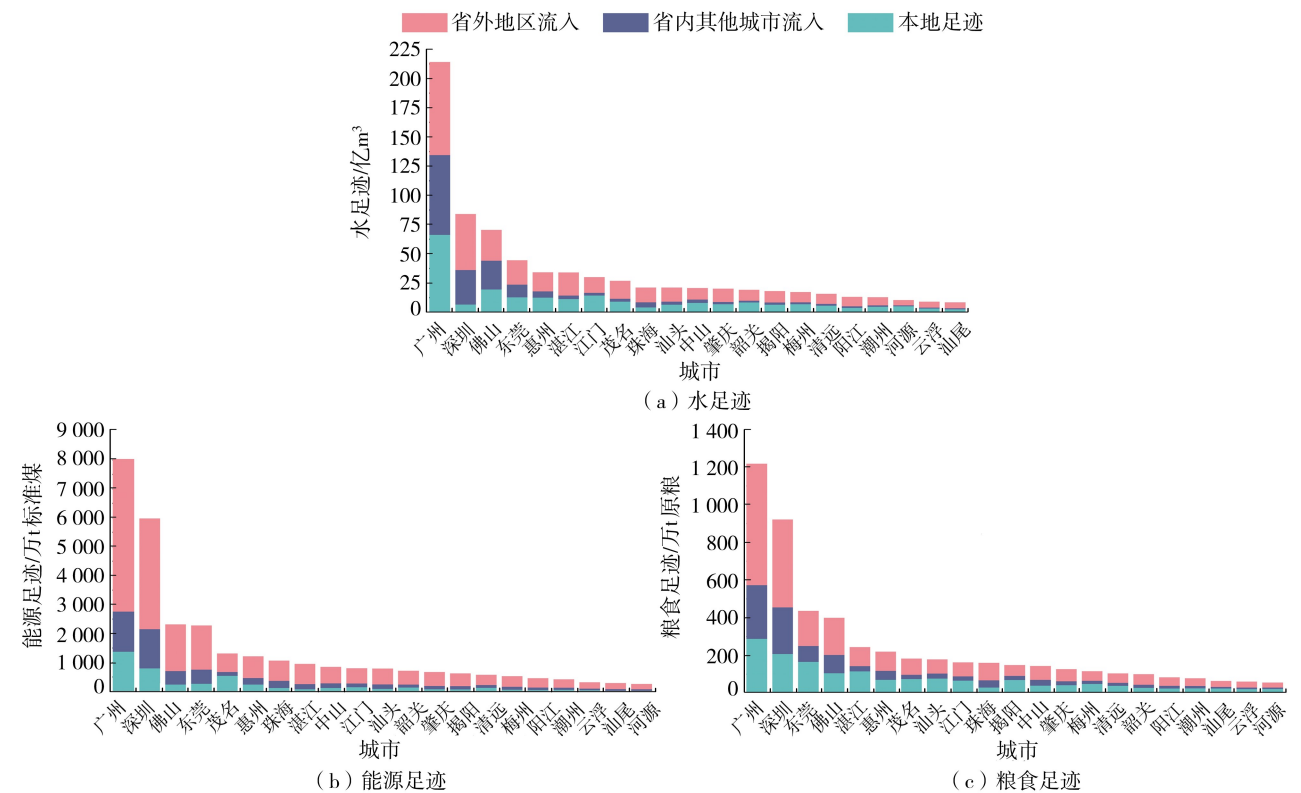


图 2 各城市消费侧水、能源、粮食足迹来源
Fig. 2 Sources of water, energy, and food footprints on consumption side of cities

式有效缓解了本地水资源压力。特别是对于一些供需矛盾突出的城市,如广州、佛山、深圳和东莞。根据 2022 年广东水资源公报,这些城市的人均水资源量低于国际公认的严重缺水临界值 500 m³。除此之外,电力、热力、燃气的生产和供应业作为第二大贡献源,平均占比达 9.7%。这主要源于当前能源生产结构特征:火力发电与核能发电仍占主导地位,其工艺系统不仅需要持续补充新鲜水,更需大量循环冷却水维持设备运行,由此形成显著的用水需求。

由图 3(b)可知,在能源足迹方面,矿业对各市消费侧能源足迹的贡献最大,平均占比达到 38.9%,其次是制造业以及运输和服务业,平均占比分别达到 33.7%和 20.6%。矿业和制造业作为传统能源密集型行业,其生产工艺链长且累积能耗较高;运输业因依赖化石燃料的特性而耗能显著;服务业则因日常运营和消费需求与能源供应存在深度关联。相比之下,其余行业对消费侧能源足迹的贡献相对较低,总和不足 7%。

由图 3(c)可知,在各行业中,运输和服务业贡献了最多的粮食足迹,平均占比达到 48.9%,其次是制造业,平均占比为 25%。产生这一现象的原因可能是运输和服务业中的餐饮业需要持续保障食品供应,且存在运营过程中食材损耗和餐厨垃圾等问题,因而导致其消费侧粮食消耗高于其他行业。此外,制造业的食品深加工环节也会产生相应的粮食损耗,进而贡献较大的粮食消耗。

3.3 贸易关系下广东省各城市的水-能源-粮食系统效率

以核算出的消费侧水、能源和粮食足迹作为投入,同时以各城市的增加值作为产出,运用 DEA-SBM 模型评估了贸易活动下广东省各城市的水-能源-粮食系统效率,并将其与未考虑贸易活动的情形(以直接水、能源和粮食消耗作为投入,各城市的增加值作为产出)进行对比,如图 4 所示。具体而言,深圳在 2 种评估体系中均达到效率前沿(效率值 1,排名第 1),表明其资源投入与经济产出的综合转化效率最优。佛山、湛江在直接资源消耗视角下同样达到效率前沿(效率值 1,排名第 2、3),但在消费侧评估中效率分别下降至 0.908 和 0.588,排名降至第 3、18,这提示其生产端的集约化水平较高,但在消费端可能存在贸易隐含资源冗余的问题。广州直接资源消耗视角下效率排名第 4(0.655),而消费侧效率提升至 0.669(排名第 12),显示其作为区域中心城市通过外部隐含资源调配一定程度上优化了消费侧足迹,但幅度较小。中山在消费侧评估中跃居效率前沿(效率值 1,排名第 2),但直接消耗效率仅 0.489(排名第 7),显示出其在区域内主要担任供

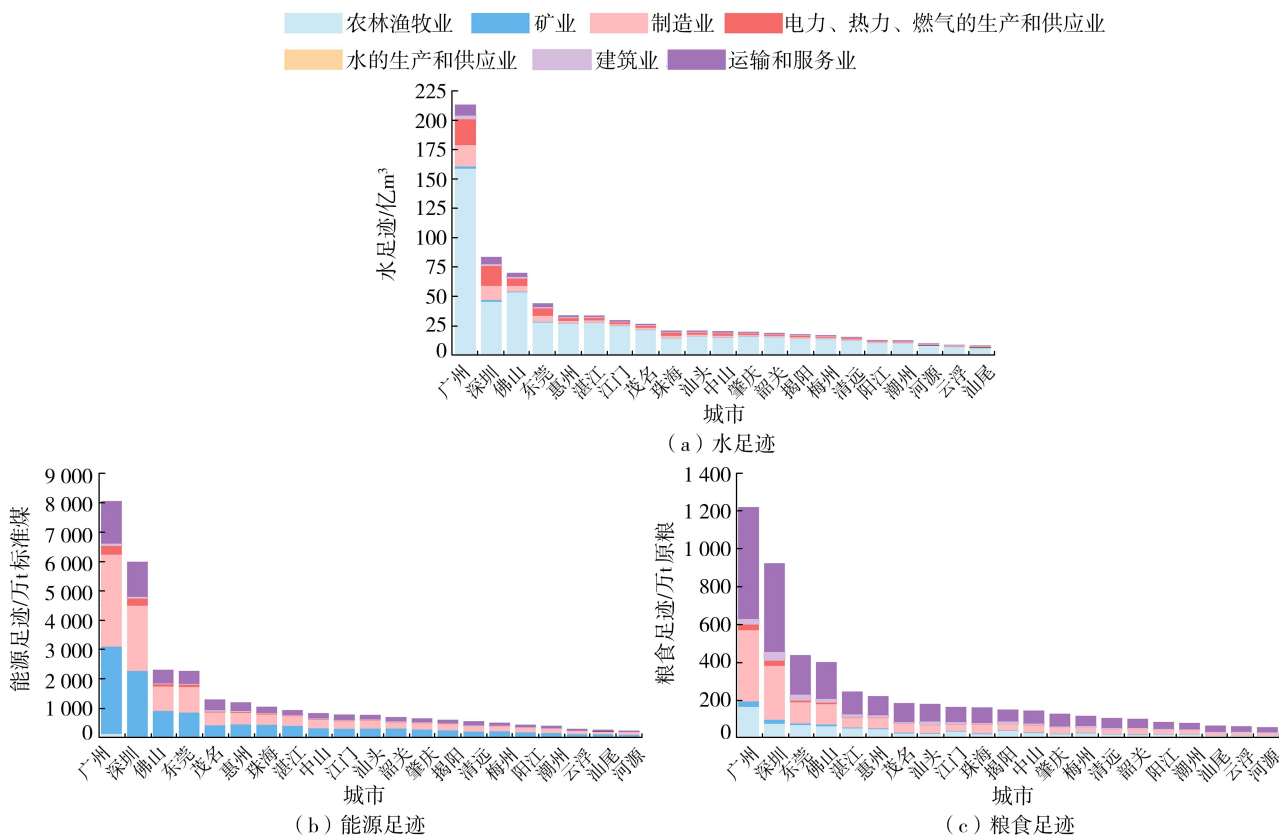


图 3 不同行业贡献的水、能源和粮食足迹

Fig. 3 Water, energy, and food footprints contributed by different sectors

给贸易隐含资源的角色,故由直接资源消耗转向消费侧环境足迹视角,其效率显著提升。

相比之下,韶关、梅州、云浮等欠发达城市在 2 种评估视角下效率均处于低位(效率值低于 0.5),特别是直接资源消耗视角下的效率普遍低于 0.25,反映出传统产业占比过高、资源利用技术落后等结构性矛盾。而河源、阳江等城市消费侧视角下的效率显著优于直接资源消耗视角下的效率,如河源的效率值从 0.247 升至 0.716,排名从第 15 升至第 8,这可能是其通过区域协作或生态补偿机制弥补了部分本地资源利用效率短板。总体来看,珠三角核心城市在 2 种评估中均表现突出,但外围城市效率分化明显。结果表明,伴随着城市的发展,区域间活跃的贸易活动导致城市间形成隐含资源转移网络,如果仅考虑生产端直接资源消耗可能会高估部分发达城市的资源利用效率,同时低估作为隐含资源供给型城市的效率。为此,有必要建立涵盖“生产-流通-消费”全链条的资源效率评估模型,将隐含资源流动(如水资源、能源等)纳入核算体系,从而更好地揭示城市的资源利用效率。

3.4 广东省各城市水、能源、粮食资源节约潜力

基于 DEA-SBM 模型的效率评估结果,本文对广东省各城市的水、能源和粮食足迹的投入冗余量进行了可视化分析,以揭示各城市的资源节约潜力,如图 5 所示。效率最优的深圳和中山因水-能源-粮食系统效率值均达到 1,其水足迹、能源足迹和粮食足迹冗余量均为 0,形成全省资源高效配置的标杆。分城市看,在水足迹方面,广州以 84 亿 m³ 的冗余量居首,湛江(17.3 亿 m³)和佛山(15.8 亿 m³)分居其后。在能源足迹方面,广州的投入冗余量最高,达到 2703 万 t 标煤;茂名、韶关、珠海和惠州的投入冗余量也相对较大,均高于

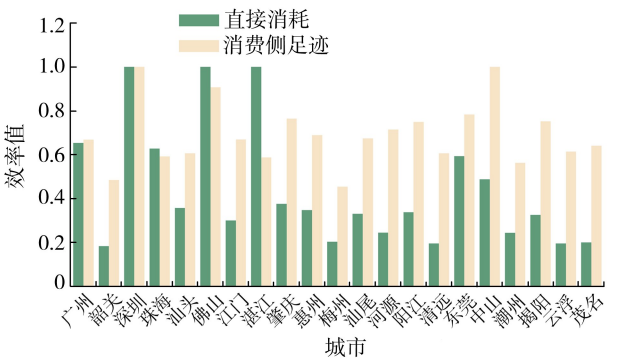


图 4 广东省各城市水-能源-粮食系统效率

Fig. 4 Efficiency of water, energy, and food systems in cities of Guangdong Province

250 万 t 标煤。值得注意的是,揭阳的能源足迹投入冗余量为 0,但由于其水足迹和粮食足迹存在一定冗余,未能达到最优的投入产出配置。在粮食足迹方面,广州的投入冗余量最大,达到 31.7 万 t 原粮;湛江和东莞的投入冗余量也相对较高,均位于 10 万 t 原粮之上。全省除深圳、中山 2 个标杆城市外,其余城市均存在差异化的资源优化空间,其中广州作为水、能源、粮食综合冗余量最大的城市,需重点突破产业链资源循环利用瓶颈,而其余城市则需针对各自高冗余资源类型制定精准化改进方案。

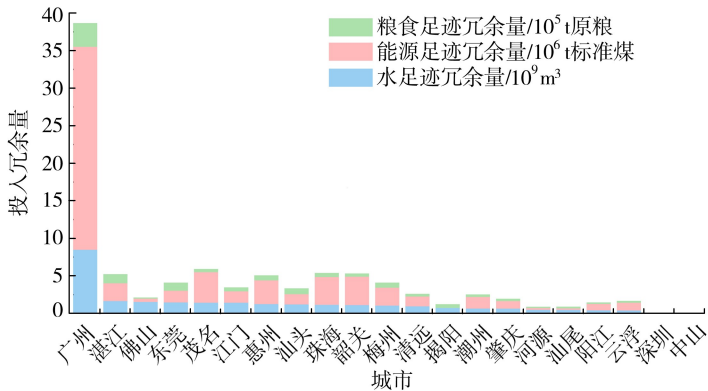


图5 广东省各城市水、能源、粮食足迹冗余量

Fig. 5 Redundancy of water, energy, and food footprints in cities of Guangdong Province

3.5 广东省各城市足迹量与效率的空间分布特征

由图 6(a)~(c)可知,足迹量的空间分布主要呈现由珠三角地区向外部递减的趋势,其中广州、深圳、佛山和东莞足迹量的占比(足迹量与区域足迹总量的比值)最高。相对而言,粤西、粤东和粤北地区绝大多数城市的足迹量占比相对较低。由图 6(d)可知,效率与足迹量的空间分布特征大体一致,主要呈现由珠三角地区向粤西、粤东和粤北地区递减的趋势。其中,深圳、中山和佛山是效率最高的城市,效率值介于 0.9~1.0 之间。紧随其后的是东莞、肇庆、阳江、河源以及揭阳,这些城市的效率均在 0.7 以上。结合消费侧水、能源和粮食足迹与效率的空间分布特征进一步分析,可以观察到珠三角地区的一些城市,如深圳和佛山,在产生

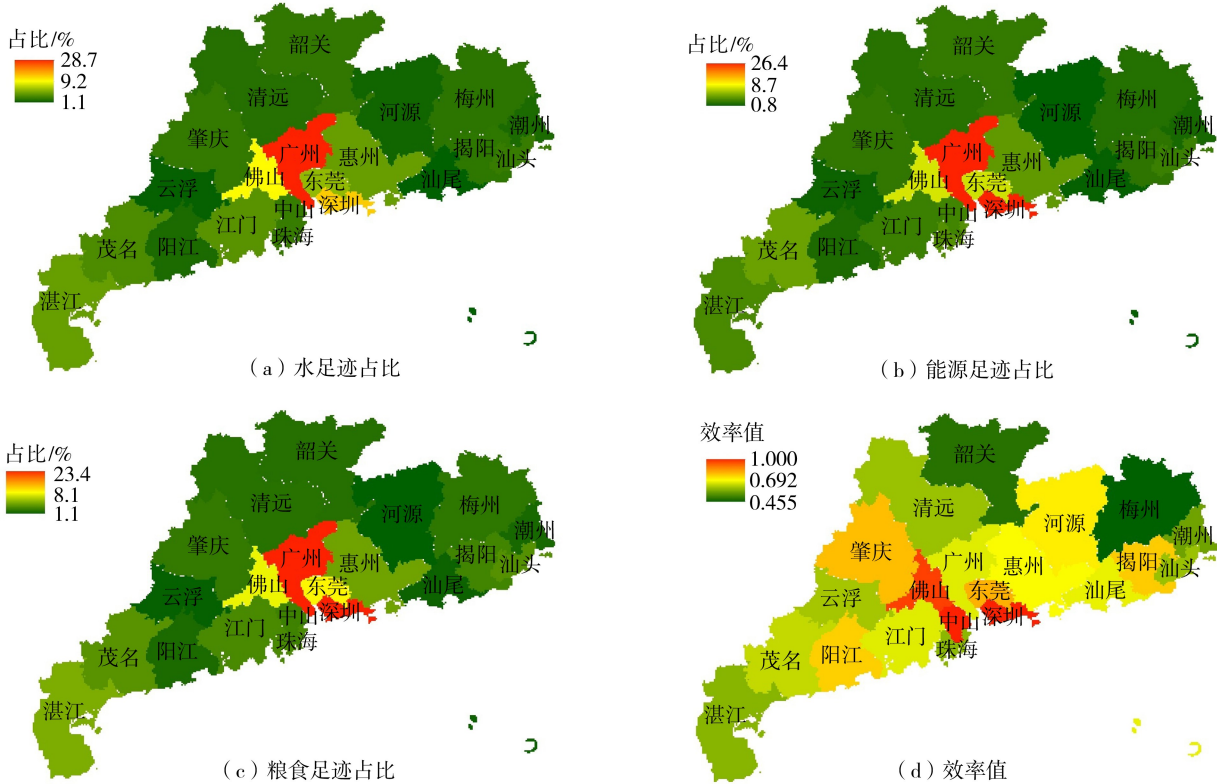


图6 广东省各城市足迹占比与效率值的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of footprint proportion and efficiency in cities of Guangdong Province

较高足迹量的同时保持了较高的投入产出效率,体现了充分利用外部流入隐含资源的特点。其次,对于阳江、肇庆、河源和揭阳 4 座城市,它们产生的足迹量相对较低,但仍保持了较高的投入产出效率,符合资源集约化利用的特点。相比之下,韶关、梅州、湛江和潮州等城市尽管足迹量处于中下水平,但由于投入产出效率较低,需要引导其向低资源消耗、高附加值的发展模式转变。

3.6 政策建议

对于珠三角城市群中水、能源和粮食消费侧足迹量较大的城市(广州、深圳、佛山、东莞),考虑到它们的人均水资源量相对较低,首要之务在于加强新技术的研发和应用,进一步推动资源的集约化利用。其次,对于佛山、深圳和东莞,由于其投入产出效率较高,地方决策者可以考虑加强区域间贸易,增加外来隐含资源的供给比例,减少本地资源消耗,从而缓解当地资源压力。此外,鉴于广州存在着足迹量大、投入产出效率低的情况,可鼓励其借鉴佛山、深圳和东莞的发展经验,形成低资源消耗-高附加值的发展模式。

对于粤东、粤北和粤西地区的一些城市,如韶关、梅州、湛江和潮州,尽管它们产生的消费侧足迹处于中下水平,但由于投入产出效率较低,需要引导其向低资源消耗-高附加值的发展模式转变。考虑到这些城市分别与阳江、肇庆、河源和揭阳 4 座城市相邻,这 4 座城市在产生较低足迹量的同时保持较高的投入产出效率,展现了资源集约化利用的优势。因此,地方决策者可考虑加强区域间合作,借鉴这些城市的资源管理模式,以进一步提高资源利用效率。

4 结 论

a. 从总量上看,珠三角地区中的广州、深圳、佛山、东莞的消费侧水、能源和粮食足迹居于广东省前列,而粤东、粤西、粤北地区绝大多数经济欠发达城市的消费侧足迹相对较少。从来源上看,广东省各城市消费侧水、能源和粮食足迹以省外地区流入为主,其次是本地消费足迹。相比之下,各城市通过贸易从省内其他城市输入的贸易隐含资源占比较小。从行业上看,农林渔牧业、矿业、运输和服务业分别是各城市消费侧水、能源和粮食足迹贡献最大的行业。

b. 在效率评估结果上,珠三角地区的城市普遍高于粤东、粤西和粤北地区的城市。在考虑区域间贸易对水、能源和粮食消费的影响下,大多数城市的效率得到改善,区域整体效率提高。在各城市中,深圳和中山达到了最优的投入产出配置,其余城市具有不同的投入冗余量,广州具有最大的资源节约潜力。

c. 效率与足迹量的空间分布格局趋同,主要呈现由珠三角地区向粤西、粤东和粤北地区递减的趋势。深圳、佛山和东莞等城市产生的足迹量较高,同时保持了较高的投入产出效率,反映了对外部流入隐含资源的高效利用。阳江、肇庆、河源和揭阳则呈现出足迹量低但投入产出效率高的特点,符合资源集约化利用的模式。相比之下,韶关、梅州、湛江和潮州等城市的足迹量虽处于中下水平,但由于投入产出效率较低,因此需要进一步推动这些城市向低资源消耗、高附加值的发展模式转变。

d. 区域间活跃的贸易活动导致城市间形成隐含资源转移网络,如果仅考虑生产端直接资源消耗可能会高估部分发达城市的资源利用效率,同时低估作为隐含资源供给型城市的效率。为此,有必要建立涵盖“生产-流通-消费”全链条的资源效率评估模型,将隐含资源流动(如水资源、能源等)纳入核算体系,从而更好地揭示城市的资源利用效率。

参考文献:

[1] 李激,姜珊,赵勇,等. 京津冀水-能源-粮食耦合系统安全评价[J]. 水资源保护,2023,39(5):39-48. (LI Wei,JIANG Shan, ZHAO Yong, et al. Safety evaluation of water-energy-food coupling system in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Water Resources Protection,2023,39(5):39-48. (in Chinese))

[2] 洪思扬,程涛,王佳友,等. 贸易视角下广东省水-能源-粮食流通与资源间压力互馈研究[J]. 水资源保护,2024,40(6):48-57. (HONG Siyang,CHENG Tao,WANG Jiayou,et al. Research on water-energy-food circulation and interaction pressure between resources in Guangdong Province from perspective of trade[J]. Water Resources Protection,2024,40(6):48-57. (in Chinese))

[3] LI Yan,ZHANG Ruilian. A review of water-energy-food nexus development in a just energy transition[J]. Energies,2023,16(17):6253.

[4] LYU Yangxi,YUAN Mingkan,ZHOU Xiaofeng, et al. The water-energy-food nexus: a systematic bibliometric analysis[J]. Environmental Science and Pollution Research,2023,30(58):121354-121369.

- [5] ZHENG Heran,TÖBBEN J,DIETZENBACHER E,et al. Entropy-based Chinese city-level MRIO table framework[J]. *Economic Systems Research*,2022,34(4) :519-544.
- [6] ZHU Wenjing, DUAN Cuncun, CHEN Bin. Energy efficiency assessment of wastewater treatment plants in China based on multiregional input-output analysis and data envelopment analysis[J]. *Applied Energy*,2024,356:122462.
- [7] WANG Qiang,JIANG Feng,LI Rongrong. Assessing supply chain greenness from the perspective of embodied renewable energy: a data envelopment analysis using multi-regional input-output analysis[J]. *Renewable Energy*,2022,189:1292-1305.
- [8] 王恒,方兰. 中国水-能源-粮食纽带系统安全水平与全要素生产率时空耦合协调关系分析[J]. *水资源保护*,2023,39(1) : 150-157. (WANG Heng,FANG Lan. Spatial-temporal coupling coordination relationship between the security level of water-energy-food nexus system and total factor productivity in China[J]. *Water Resources Protection*,2023,39(1) :150-157. (in Chinese))
- [9] 赵良仕,江家喜,王泽宇. “海丝”沿线国家渔业贸易隐含能源流动网络特征及影响因素[J]. *自然资源学报*,2024,39(11) :2691-2720. (ZHAO Liangshi,JIANG Jiayi,WANG Zeyu. The characteristics and influencing factors of the embodied energy flow network in fishery trade among countries along the 21st Century Maritime Silk Road[J]. *Journal of Natural Resources*,2024,39(11) :2691-2720. (in Chinese))
- [10] 郭朝先,刘艳红. 新发展格局下中国隐含资源环境要素跨境流动问题研究[M]. 北京:经济管理出版社,2022.
- [11] 吴乐英,赵义义,苗长虹,等. 黄河流域省际贸易隐含能源流动格局及其产业链路径[J]. *资源科学*,2024,46(11) :2150-2162. (WU Leying,ZHAO Yiyi,MIAO Changhong, et al. Embedded energy flow and its industrial chain pathways in interprovincial trade within the Yellow River Basin[J]. *Resources Science*,2024,46(11) :2150-2162. (in Chinese))
- [12] FANG Guochang, HUANG Meng, ZHANG Wenbin, et al. Exploring global embodied carbon emissions transfer network: an analysis based on national responsibility[J]. *Technological Forecasting and Social Change*,2024,202:123284.
- [13] LIANG Junyi,WANG Shaojian,LIAO Yuantao, et al. Carbon emissions embodied in investment: assessing emissions reduction responsibility through multi-regional input-output analysis[J]. *Applied Energy*,2024,358:122558.
- [14] XU Zhiliang,XU Changxin,CHEN Xueli, et al. Interprovincial industrial virtual scarce water flow and water scarcity risk in China [J]. *Ecological Indicators*,2024,169:112939.
- [15] ZHANG Yujie,YUE Qiang,WANG Huanyu, et al. Analysis of carbon emission and energy consumption transfer characteristics of China’s iron and steel industry[J]. *Energy*,2025,318:134924.
- [16] CHEN Qingjuan,XU Chengzhen,WANG Qunwei. Critical contributors and transmission paths of energy consumption in China’s supply chains network[J]. *Energy Policy*,2025,198:114481.
- [17] WIEDMANN T. A review of recent multi-region input-output models used for consumption-based emission and resource accounting[J]. *Ecological Economics*,2009,69(2) :211-222.
- [18] MI Zhifu,ZHANG Yunkun,GUAN Dabo, et al. Consumption-based emission accounting for Chinese cities[J]. *Applied Energy*, 2016,184:1073-1081.
- [19] ZHANG Weiqiang,FANG Wei. Physical and virtual water transfers in China and their implication for water planetary boundary [J]. *Environmental Science and Pollution Research*,2024,31(9) :13622-13637.
- [20] LI Weidong,LI Jianwu,WEN Bojie, et al. Review of the input-output network and its application in energy and mineral industries [J]. *Frontiers in Energy Research*,2022,10:983911.
- [21] SUN Yafang,ZHANG Yuejun,SU Bin. How to improve the energy-saving performance of China’s transport sector?: an input-output perspective[J]. *Journal of Environmental Management*,2024,356:120635.
- [22] SONG Ce,LIU Zengming, CHEN Huadun, et al. The role of intermediate factors in China’s energy consumption from the perspective of global production chain[J]. *Journal of Cleaner Production*,2024,435:140263.
- [23] ZHANG Xiao,WANG Xiao,TANG Chang, et al. China’s cross-regional carbon emission spillover effects of urbanization and industrial shifting[J]. *Journal of Cleaner Production*,2024,439:140854.
- [24] WANG Feifei,ZHANG Hongyu,ZHANG Wei, et al. Tele-connecting regional carbon inequality in China to global consumers[J]. *Journal of Cleaner Production*,2024,458:142502.
- [25] HAN Xue,GAO Xincui,AHMAD F, et al. Carbon compensation and carbon neutrality: regional variations based on net carbon transfer of trade in China [J]. *Geoscience Frontiers*, 2024, 15(4) : 101809.
- [26] WANG Zhenguo,LI Tengyun,LIANG Wei, et al. Uncovering the structure and evolution of global virtual water and agricultural land network[J]. *Sustainable Production and Consumption*,2024,51:599-611.
- [27] ZHENG Heran,MENG Jing,MI Zhifu, et al. Linking city-level input-output table to urban energy footprint: construction framework and application[J]. *Journal of Industrial Ecology*,2019,23(4) :781-795.

[28] ZHENG Heran, ZHANG Zongyong, ZHANG Zengkai, et al. Mapping carbon and water networks in the North China urban agglomeration[J]. *One Earth*, 2019, 1(1): 126-137.

[29] TONE Kaoru, TSUTSUI M. Network DEA: a slacks-based measure approach[J]. *European Journal of Operational Research*, 2009, 197(1): 243-252.

[30] CHARNES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. *European Journal of Operational Research*, 1978, 2(6): 429-444.

[31] IBRAHIM M D, FERREIRA D C, DANESHVAR S, et al. Transnational resource generativity: efficiency analysis and target setting of water, energy, land, and food nexus for OECD countries[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 697: 134017.

[32] HUANG Daohan, LI Guijun, CHANG Yuan, et al. Water, energy, and food nexus efficiency in China: a provincial assessment using a three-stage data envelopment analysis model[J]. *Energy*, 2023, 263: 126007.

[33] ZHANG Yun, WU Yuping, LU Zhaoan, et al. Coupling efficiency and spatial dynamic evolution of urban water-energy-food in China-A case of evidence from 94 cities[J]. *Heliyon*, 2024, 10(12): e33187.

[34] ZHANG Pan, CAI Yanpeng, ZHOU Ya, et al. Quantifying the water-energy-food nexus in Guangdong, Hong Kong, and Macao regions[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, 29: 188-200.

[35] LIU Yufei, HU Yuanchao, SU Meirong, et al. Multiregional input-output analysis for energy-water nexus: a case study of Pearl River Delta urban agglomeration[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 262: 121255.

[36] KOWALEWSKI J. Regionalization of national input-output tables: empirical evidence on the use of the FLQ formula[J]. *Regional Studies*, 2015, 49(2): 240-250.

[37] BURGER M, VAN OORT F, LINDERS G J. On the specification of the gravity model of trade: zeros, excess zeros and zero-inflated estimation[J]. *Spatial Economic Analysis*, 2009, 4(2): 167-190.

[38] LIN Jianyi, HU Yuanchao, ZHAO Xiaofeng, et al. Developing a city-centric global multiregional input-output model (CCG-MRIO) to evaluate urban carbon footprints[J]. *Energy Policy*, 2017, 108: 460-466.

[39] 彭芳梅. 粤港澳大湾区及周边城市经济空间联系与空间结构: 基于改进引力模型与社会网络分析的实证分析[J]. *经济地理*, 2017, 37(12): 57-64. (PENG Fangmei. Economic spatial connection and spatial structure of Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay and the surrounding area cities: an empirical analysis based on improved gravity model and social network analysis [J]. *Economic Geography*, 2017, 37(12): 57-64. (in Chinese))

[40] 朱道才, 陆林, 晋秀龙, 等. 基于引力模型的安徽城市空间格局研究[J]. *地理科学*, 2011, 31(5): 551-556. (ZHU Daocai, LU Lin, JIN Xiulong, et al. Spatial patterns of city in Anhui Province based on gravity model[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(5): 551-556. (in Chinese))

[41] JAHN M. Extending the FLQ formula: a location quotient-based interregional input-output framework[J]. *Regional Studies*, 2017, 51(10): 1518-1529.

[42] HUANG Yinwen, HUANG Dechun, LI Jinqiu. Ecological network analysis of the water-energy-food metabolic system based on the MRIO model: a case study for China's Yangtze River Delta Region[J]. *Complexity*, 2023, 2023(1): 1418370.

[43] LIU Zhu, FENG Kuishuang, HUBACEK K, et al. Four system boundaries for carbon accounts[J]. *Ecological Modelling*, 2015, 318: 118-125.

[44] HUBACEK K, CHEN Xiangjie, FENG Kuishuang, et al. Evidence of decoupling consumption-based CO₂ emissions from economic growth[J]. *Advances in Applied Energy*, 2021, 4: 100074.

[45] 辛良杰, 王佳月, 王立新. 基于居民膳食结构演变的中国粮食需求量研究[J]. *资源科学*, 2015, 37(7): 1347-1356. (XIN Liangjie, WANG Jiayue, WANG Lixin. Prospect of per capita grain demand driven by dietary structure change in China[J]. *Resources Science*, 2015, 37(7): 1347-1356. (in Chinese))

[46] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130(3): 498-509.

[47] DONG Junran, WU Desheng, SONG Jingxiu, et al. Gauging the environmental efficiency with ecological compensation in presence of missing data using data envelopment analysis[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2022, 24(4): 5451-5472.