

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.04.003

广东省水资源-能源-粮食的省际流动与风险传递

洪思扬^{1,2}, 方伟^{1,2}, 王佳友^{1,2}, 杨震宇^{1,2}, 林漫婷^{1,2}, 王红瑞³

(1. 广东省农业科学院农业经济与信息研究所, 广东 广州 510640;

2. 农业农村部华南都市农业重点实验室, 广东 广州 510640; 3. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

摘要: 基于多区域投入产出表,核算了广东省与中国各省份间的水资源、能源、粮食(water, energy, food, WEF)资源流动情况,并创新性地量化了各省份与广东省间通过 WEF 资源流动而传递的风险值,探索了风险传递价值。结果表明:省际 WEF 资源贸易中,广东省总计净流入 117.06 亿 m³ 体现水,2.80×10⁹GJ 体现能源,1 622.93 万 t 体现粮食,大多数省份均对广东省净流入 WEF 资源,且以广西、河南、安徽、湖南四省最多;广东省 WEF 资源的影响力系数及感应度系数均较低,在全国 WEF 资源贸易中对其他省份的带动作用 and 影响力不强,且对其他省份资源消耗变化的感应能力较弱;WEF 资源流动传递的风险值对于输入地区和输出地区是非对称性的,对于大多数省份而言,WEF 资源流入广东省的风险传递价值较高,在缓解广东省 WEF 资源风险的基础上,并未显著提升自身风险,且以海南、天津、上海、河南、甘肃较为显著;云南、北京、山西、浙江的风险传递价值则相对较低,广东省对其资源输入而产生的 WEF 资源风险相对较大。

关键词: 水资源-能源-粮食;资源流动;风险传递;广东省

中图分类号:F121.3

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2025)04-0018-10

Inter-provincial water, energy, and food flow and risk transfer in Guangdong Province

HONG Siyang^{1,2}, FANG Wei^{1,2}, WANG Jiayou^{1,2}, YANG Zhenyu^{1,2}, LIN Manting^{1,2}, WANG Hongrui³

(1. Institute of Agricultural Economics and Information, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Key Laboratory of Urban Agriculture in South China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510640, China;

3. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Based on the multi-regional input and output table, the water, energy, and food (WEF) resource flow between Guangdong Province and other provinces/autonomous regions/cities in China was calculated, and the amount of risk transferred through WEF resource flow between these provinces/autonomous regions/cities was innovatively quantified. Moreover, the value of risk transfer was explored. The results show that: in the inter-provincial WEF resource trade, the net inflow of embodied water to Guangdong Province is 11.706 billion cubic meters; the net inflow of embodied energy is 2.80×10⁹GJ, and the net inflow of embodied food is 16.229 3 million tons. Most regions have a net inflow of WEF resources to Guangdong Province, with Guangxi Zhuang Autonomous Region, Henan, Anhui, and Hunan provinces exhibiting the highest inflow values. The influence coefficient and induction coefficient of WEF resources in Guangdong Province are low, and the driving and influence effect on other provinces/autonomous regions/cities in the national WEF resource trade is not strong. In addition, the induction ability of resource consumption changes in other provinces/autonomous regions/cities is weak. The risk transfer value of WEF resource flows exhibits an asymmetrical pattern between input and output regions. For most regions, the risk transfer value of WEF resource flow into Guangdong Province is high. On the basis of alleviating the risk of WEF resources in Guangdong Province, the risk in these regions has not significantly improved, especially in Hainan Province, Tianjin City, Shanghai City, Henan Province, and Gansu Province. The risk transfer value of Yunnan Province, Beijing City, Shanxi Province, and Zhejiang Province is relatively low, and the WEF resource risk caused by the resource input of

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879010); 广东省自然科学基金项目(2024A1515012313); 广东省哲学社会科学规划项目(GD25CYJ16, GD23YYJ15, GD23YYJ14); 广东省农业科学院“中青年学科带头人”培养项目(R2023PY-JX022)

作者简介: 洪思扬(1990—),女,副研究员,博士,主要从事资源经济研究。E-mail:hongsy@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 王红瑞(1963—),男,教授,博士,主要从事水资源系统分析研究。E-mail:henrywang@bnu.edu.cn

引用本文: 洪思扬,方伟,王佳友,等. 广东省水资源-能源-粮食的省际流动与风险传递[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(4): 18-27.

HONG Siyang, FANG Wei, WANG Jiayou, et al. Inter-provincial water, energy, and food flow and risk transfer in Guangdong Province [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(4): 18-27.

Guangdong Province is relatively large.

Key words: water, energy, and food; resource flow; risk transfer; Guangdong Province

水资源、能源、粮食(water, energy, food , WEF)是维系人类生存和经济社会稳定发展的重要物质保障,在气候变化、城市化加速和人口增长的背景之下,WEF 需求的持续增长是未来面临的重要挑战^[1],产业和人口的集聚也将对三类资源形成更高需求和更强依赖。中国幅员辽阔,各地资源禀赋,消费水平和生产能力不均衡、不匹配,WEF 系统难以协同保障^[2-3]。统筹考虑 WEF 同区域经济发展之间的关联,实现资源的高效合理利用,对可持续发展至关重要^[4-6]。

“WEF 风险”被全球风险报告列为值得重点关注的 3 类风险之一,波恩会议率先提出“水资源-能源-粮食纽带”(WEF nexus)的概念,随后,这一概念引起相关学者的广泛关注^[7],进而开展了系统研究^[8-9]。WEF nexus 相关研究方面,系统风险研究侧重于探究 3 种资源协同管理的风险问题。按照研究对象区别,WEF 系统风险研究大体可以概括为生态环境风险和供需风险两大类。生态环境风险方面,大多数研究处于理论模型和风险评估框架的构建阶段^[10],以单一要素表征环境风险为主,如水污染^[11]、温室气体^[12]、热污染^[13]等,少量研究涉及不同风险指标的组合。供需风险方面,WEF 系统供需风险的核心点在于资源供需矛盾问题的叠加,降低系统风险的实质就是确保 3 类资源的协同供需匹配,实现资源、经济与环境可持续发展。目前,WEF 供需风险协同管理相关研究中,以水资源^[14]、能源^[15]、粮食^[16]中的单一风险要素评估为主,水资源-能源-粮食协同供需风险研究较少,仅有少数研究构建了 2 种资源的综合风险评估模型,如基于 Copula 函数及 SD 系统动力学模型,对水资源与能源综合风险进行量化评估^[17],或基于单一风险指数的 WEF 系统风险评估^[18-19]。此外,贸易可能引发地区或部门之间的 WEF 风险传递。目前,WEF 风险传递方面研究相对匮乏,部分学者完成了开创性成果:张盼等^[20-21]构建了 WEF 多维风险分析框架,描述并评估了粤港澳地区 WEF 多维风险传递过程,探究了 WEF 系统多维风险的决定性因素。

在粤港澳大湾区高速建设的背景之下,广东省经济社会发展进程不断加速,对 WEF 形成更大的需求。广东省水资源总量丰富,但人均占有量低,时空分布不均,且与产业布局错位分布^[22]。能源消费量年增长率高于全国均值,带来了大量温室气体的排放,对生态及人居环境造成负面影响^[23]。粮食生产中,广东省人均耕地面积仅为全国的 1/4 和世界的 1/9^[24],作为我国粮食主销区,粮食安全保障任务十分繁重,农业面源污染问题依旧突出。广东的省际和国际贸易十分活跃,WEF 蕴含于产品和服务之中发生流动,重构了资源的原始空间分布,贸易可能引发潜在的资源供需风险传递,充分考虑 WEF 综合风险管理十分必要,而目前针对 WEF 纽带关系开展的风险传递研究仍旧匮乏。基于此,本文以广东省为研究对象,核算广东省与中国各省份之间的 WEF 资源流动关系,研究广东省在全国 WEF 资源贸易中的优势地位,在此基础上,创新性地量化了广东省与中国其他省份之间通过 WEF 资源流动而传递的风险量,剖析风险传递特征规律,以期资源优化利用和保障地区用水、用能和粮食安全提供关键技术支撑,从而实现广东省经济与资源高质量协同发展。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究方法

1.1.1 中国地区间投入产出模型

本文采用的 2017 年中国多区域投入产出表来自 CEADs 中国碳核算数据库,投入产出表涵盖了 31 个省级行政区和 42 个社会经济部门。本文旨在探索广东省与其他省份之间的 WEF 资源流动关系,因此将每个省级行政区各自的 42 个部门进行合并处理,中间使用和最终消费两部分均做合并。值得注意的是,投入产出表不包含港澳台地区数据,西藏自治区的能源统计数据缺失,因此研究中剔除西藏自治区,最终获得 30 个省份的省际投入产出表。

1.1.2 WEF 资源地区间流动核算

WEF 资源以产品和服务为载体,流动于不同地区和部门之间。本文选用体现资源,表征在生产或制造过程中直接消耗和间接投入的资源要素总和^[25-26]。体现水、体现能源、体现粮食分别表征各地区经济部门在生产或制造过程中直接消耗和间接投入的水、能量、粮食总量。为量化资源流动,研究首先核算资源消耗系数,以水资源为例进行说明,能源和粮食的计算方法与之类似,不再赘述。

直接用水系数矩阵 C_w 为

$$C_w = (W_1/X_1, W_2/X_2, \dots, W_n/X_n) \tag{1}$$

式中: W_i 为省份 i 的直接用水量, $i=1, 2, \dots, 30$; X_i 为省份 i 的总产出; n 为省的数量, 本文取 30。

完全用水系数矩阵 C'_w :

$$C'_w = C_w(I - A)^{-1} \tag{2}$$

式中: $(I - A)^{-1}$ 为列昂捷夫逆矩阵; I 为单位矩阵; A 为直接需求系数矩阵。完全用水系数表征单位产值的产品直接和间接消耗的总水量。进一步计算体现水的省际流量:

$$W_{ij} = C_{wi}(1 - a_i)^{-1}(Z_{ij} + F_{ij}) \tag{3}$$

式中: W_{ij} 为省份 i 借助于产品和服务流入省份 j 的体现水量; C_{wi} 为省份 i 的直接用水系数; a_i 为直接需求系数矩阵的主对角线元素; Z_{ij} 为省份 i 流入省份 j 的中间使用量; F_{ij} 为省份 i 流入省份 j 的最终消费量。 Z_{ij} 和 F_{ij} 均可通过投入产出表获取。各省份体现水省际流量 W_{ij} 的所有元素构成体现水流动矩阵 W_{total} , 由此计算体现水转移矩阵 $W_{net-trans}$:

$$W_{net-trans} = W_{total} - W_{total}^T \tag{4}$$

$W_{net-trans}$ 中各元素代表该地区体现水流入、流出量的差值, 对角线处的元素为 0, 表示省内部未发生体现水转移。将矩阵内的负值归零, 可以更加直观地展示体现水的单一方向净流动情况, 得到净体现水分配矩阵 W_{net} , 据此计算体现水净流量^[27] W_{net-f} :

$$W_{net-f} = W_{net-ex} - W_{net-in} \tag{5}$$

式中: W_{net-ex} 为流出某省的净体现水量, 为矩阵 W_{net} 的各行之和; W_{net-in} 为流入某省的净体现水量, 为矩阵 W_{net} 的各列之和。 W_{net-f} 中元素大于 0 代表地区为体现水净出口, W_{net-f} 中元素小于 0 代表地区为体现水净进口。

1.1.3 资源流动关联指数构建

1.1.3.1 资源影响力系数

资源影响力系数指当某一部门产值变动时, 对其他所有部门的资源需求所产生的影响程度, 反映了该部门对整个经济系统资源消耗的带动作用 and 影响力^[28], 同样以水资源为例, 计算方法如下:

$$K_q = \frac{\sum_{p=1}^m b_{pq} C'_{wq}}{\frac{1}{m} \sum_{p=1}^m \sum_{q=1}^m b_{pq} C'_{wq}} \tag{6}$$

式中: K_q 为部门 q 的资源影响力系数; b_{pq} 为列昂捷夫逆矩阵系数, 代表部门 q 增加单位最终使用时, 对部门 p 产生的完全需求量; m 为部门总数; C'_{wq} 为部门 q 的完全用水系数。

$K_q > 1$ 代表部门 q 增加最终需求对其余部门用水增长的影响能力超过经济系统平均水平, $K_q < 1$ 则代表低于平均水平。资源影响力系数在传统影响力系数的基础上, 增加了资源的完全消耗项, 在考量经济关联的基础上, 进一步考虑了完全资源消耗对其他部门资源消耗的带动和影响作用。

1.1.3.2 资源感应度系数

资源感应度系数指当各部门增加单位最终需求时, 某一部门所需增加的资源消耗量, 反映了该部门对整个经济系统生产力变化而产生的感应能力, 计算方法如下:

$$M_q = \frac{\sum_{p=1}^m g_{pq} C'_{wq}}{\frac{1}{m} \sum_{p=1}^m \sum_{q=1}^m g_{pq} C'_{wq}} \tag{7}$$

式中: M_q 为部门 q 的资源感应度系数; g_{pq} 为矩阵 $(I - A)^{-1}$ 中的元素。 $M_q > 1$ 代表部门 q 对其他部门的用水需求感应力超过了经济系统的平均水平, $M_q < 1$ 则代表低于平均水平。

1.1.4 资源风险指数构建

1.1.4.1 WEF 资源压力指数构建

资源使用的压力主要体现于资源需求和资源禀赋条件之间的矛盾, 通常情况下, 资源压力指数越高, 该地区发生资源短缺的可能性越大。本文构建的水资源压力指数^[29-30]、能源压力指数^[31]、粮食压力指数^[32-33]

如下:

$$I_W = D_W / Q \tag{8}$$

$$I_E = D_E / D_{R,E} \tag{9}$$

$$I_F = (D_F - S_F) / D_F \tag{10}$$

式中: I_W 为水资源压力指数,数值越大,表明用水对本地水资源造成的压力越大; D_W 为水资源直接开采量; Q 为可更新水资源量; I_E 为能源压力指数,数值越大,表明能源消耗对本地能源造成的压力越大; D_E 为本地开采且直接消费的能源; $D_{R,E}$ 为能源开采量; I_F 为粮食压力指数,以粮食缺口率表征,越大,表明粮食消耗对本地粮食生产造成的压力越大; D_F 为粮食消费量; S_F 为粮食供给量。 I_F 直接反映了粮食的实际供求情况,是衡量地区粮食自给自足能力的重要参数,与粮食压力之间存在显著的正相关关系。

1.1.4.2 WEF 资源风险指数构建

I_W 、 I_E 和 I_F 分别表征了水资源、能源、粮食的资源使用压力,对其进行归一化处理,得到介于 0~1 之间的数值,可视作资源短缺风险发生的可能性^[34],结合资源影响力系数,即综合考虑资源短缺风险的可能性与风险的影响,构建资源短缺综合风险指数,同样以水资源为例:

$$R_q = W_{sl,q} K_q \tag{11}$$

式中: R_q 为部门 q 的资源短缺综合风险指数,数值越大表明某一地区的资源使用压力越大,对其他地区资源消耗的带动作用 and 影响力越强,其资源短缺综合风险越大。能源及粮食的风险指数可分别通过 I_E 和 I_F 与影响力系数相乘获取。为缩小数值差异,便于省份间 R_q 的对比分析,本文对计算结果进行归一化处理。

1.1.4.3 WEF 资源流动风险传递

综合考虑随贸易发生的资源流动与资源短缺综合风险,可对由资源贸易传递的资源风险进行量化:

$$R = W_{\text{net-trans}} C_w^{-1} R_q \tag{12}$$

式中 R 为风险传递矩阵,矩阵中的元素对应风险量,当 R 中的元素为正时,代表该地区由资源输入而减小的风险量,为负则代表由资源输出而增加的风险量。基于式 (12),可计算任意两省之间的资源流动风险传递价值,即资源输入地区的风险减小量(正值)与资源输出地区的风险增加量(负值)的比值。

1.2 数据来源

本文涉及投入产出、水资源、能源、粮食四方面数据。广东省投入产出表由广东省统计局颁布,中国多区域投入产出表通过 CEADs 中国碳核算数据库免费获取;用水数据源自各省份水资源公报;能源开采量和消费量源自各省份能源统计年鉴;粮食生产量和消费量源自各省份统计年鉴。

2 结果与分析

2.1 广东省 WEF 资源流动情况

基于中国多区域投入产出表,核算得到 2017 年中国各省份与广东省的 WEF 资源流动情况,如图 1 所示。由图 1 可知,中国绝大多数省份均对广东省净流入 WEF 资源。对于体现水而言,净流入广东省的省份数量为 22 个,总计流入 138.17 亿 m^3 体现水,净流出省份数量为 7 个,总计流出 21.11 亿 m^3 体现水,因此净流入总量为 117.06 亿 m^3 。广西(23.20 亿 m^3)、江苏(13.55 亿 m^3)、江西(11.78 亿 m^3)三省区总计占体现水净流入量的 35.12%;浙江(11.95 亿 m^3)和北京(6.46 亿 m^3)则是广东省体现水的主要输出地区。体现能源方面,净流入广东省的省份数量为 24 个,总计流入 3.09×10^9 GJ 体现能源,净流出省份数量为 5 个,总计流出 2.93×10^8 GJ 体现能源,净流入总量为 2.80×10^9 GJ;河北(3.23×10^8 GJ)、河南(2.90×10^8 GJ)、广西(2.60×10^8 GJ)等省区净流入量较大,浙江(1.69×10^8 GJ)、北京(0.69×10^8 GJ)等省市净流出量较大。体现粮食方面,净流入广东省的省份数量为 23 个,总计流入 1867.19 万 t 体现粮食,流出省份数量为 6 个,总计流出 244.26 万 t 体现粮食,净流入总量为 1622.93 万 t;河南(228.52 万 t)、广西(227.58 万 t)等省区的净流入量较大,浙江(125.27 万 t)、北京(76.49 万 t)等的净流出量较大。综合 WEF 的 3 类资源来看,广西、河南、安徽、湖南四省区同时对广东省有较大的 WEF 资源净流入量。相比之下,广东省对少数省份净流出 WEF 资源,其中以北京市、浙江省的净流出量较大。

2017 年,广东省用水量位居全国第三,能源消费量和粮食消费量均位居全国第二,庞大的人口基数和高速发展的经济均需要大量的资源供给,外省的资源供给为广东省经济社会发展提供了很大帮助。对于 WEF

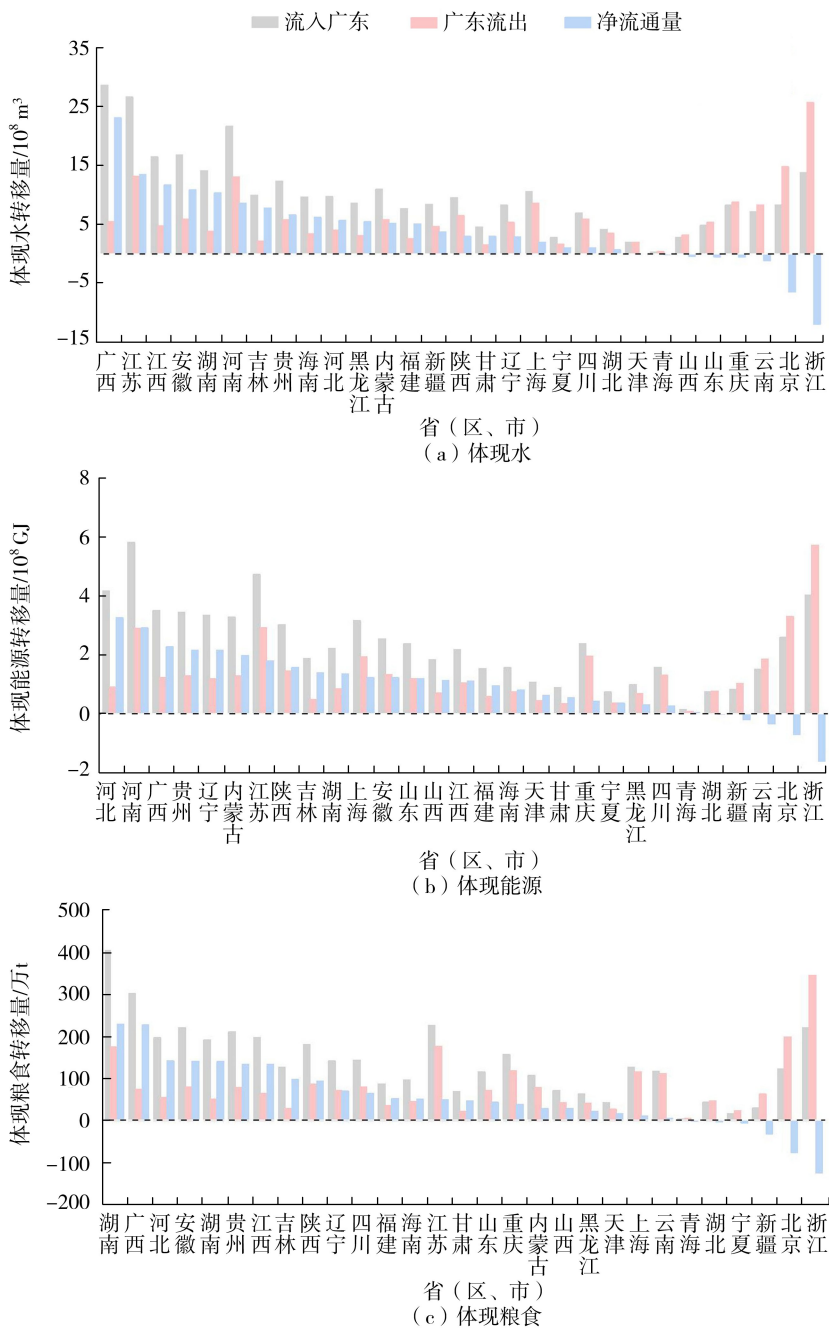


图 1 广东省与中国各省(区、市)间的资源流动关系

Fig. 1 Resource flow relationship between Guangdong Province and other provinces/autonomous regions/cities in China

这 3 类资源而言,资源流动有实体资源流动和间接资源流动 2 种形式,能源和粮食可通过实体资源的形式流动于不同省份之间,除北方地区接收一定的跨流域调水外,水资源很少以实体水的形式发生地区间的转移,而 WEF 资源密集型产品则不受资源属性和地理空间的限制,富集于产品或服务之中在不同省份之间流动,为广东省提供了大量的间接资源供给。广西、河南、安徽、湖南等对广东省净流入较多的 WEF 资源,一是源于地区相对丰富的资源量,二是源于同广东省之间密切的经济往来,即受资源禀赋和经济贸易的双重驱动,较大程度地缓解了广东的 WEF 资源使用压力。

2.2 广东省 WEF 资源关联分析

为分析广东省资源贸易在全国的需求感应程度,计算了中国各省的体现水、体现能源、体现粮食的资源影响力系数和感应度系数,结果如图 2 所示。广东省 3 类资源的关联指数均较低,在中国各省份中排名均靠后,说明在全国 WEF 资源贸易中,广东省对其他省份资源消耗的带动作用 and 影响力不强,且对整个经济系统

资源消耗变化而产生的感应能力相对较弱,在全国 WEF 资源贸易中的鲁棒性较强;影响力系数和感应度系数同时小于 1,说明广东省对其他省份 WEF 资源消耗变化的影响程度和感应能力均低于全国平均水平。

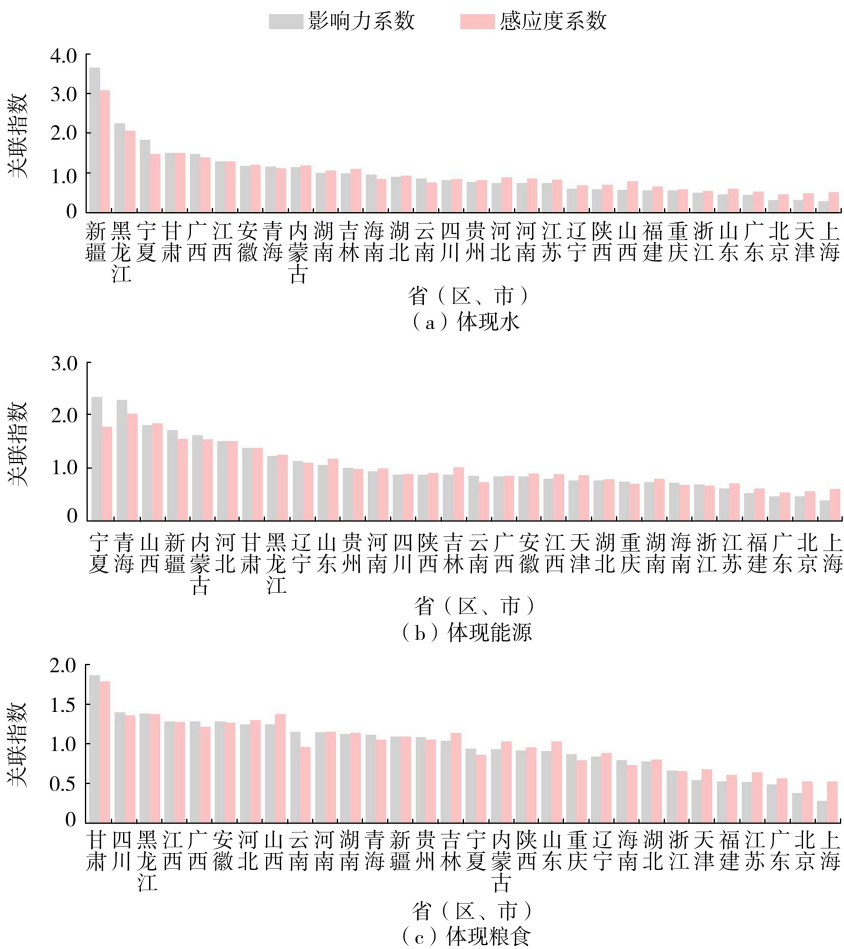


图 2 中国各省(区、市)资源流动关联指标

Fig. 2 Correlation indicators of resource flows in provinces/autonomous regions/cities of China

由图 1(a)可知,广西、江西、安徽与广东体现水贸易频繁,净流入广东大量体现水,以上三省区的体现水影响力系数和感应度系数均较高,说明三省区对全国体现水贸易的影响作用和感应能力均较强,当水资源贸易结构发生变化时,可能发生资源短缺的风险更大,从而产生由贸易引发的连锁反应,使得体现水贸易风险影响范围进一步扩大。因此,当选择水资源贸易伙伴时,为统筹考虑本地及对其他地区的影响,可适当考虑增加与资源关联系数较小且资源禀赋条件较好省份的合作,如湖南和江苏,以兼顾经济发展和资源贸易供需安全。同理,体现能源贸易中的河北、内蒙古、辽宁,体现粮食贸易中的广西、河北、安徽,均属于与广东省资源贸易频繁且资源关联系数较大的省份,实际资源贸易中,可对以上省份的资源密集型产品或服务贸易量进行调整。

2.3 广东省 WEF 资源压力与资源风险传递分析

鉴于资源禀赋条件的差异,中国不同省份的 WEF 资源压力差异较大。由图 3 可知,水资源压力较大的省份以水资源匮乏的北方省份居多;能源压力相对均衡,除山西、陕西、内蒙古等能源禀赋条件较好地区具有较低的压力指数,其他大多数省的能源压力指数相差不大;粮食压力指数取决于粮食消费量和供给水平,各省差异较大,负值代表粮食产销出现富余。对于广东省而言,按照资源压力由大到小排序,水资源压力排名第 17,能源压力排名第 8,粮食压力排名第 4,广东省水资源丰沛,能源开采量和粮食生产量低,但消耗量巨大,资源省际贸易为缓解 WEF 资源禀赋条件不足产生的资源压力提供了有效手段。

为清晰表达 WEF 资源流动产生的风险传递情况,更直观地展示广东省的 WEF 资源流动对输入和输出地区的影响,计算风险传递值,结果见表 1。由表 1 可知,资源流动传递的风险值对于输入地区和输出地区并非对称,(2)列数值显著高于(1)列数值,(2)列普遍为正值,代表广东省的 WEF 资源风险因外部资源输入而有所降低,(1)列普遍为负值,代表广东省的 WEF 资源风险因资源输出而有所增加。我国大多数省的

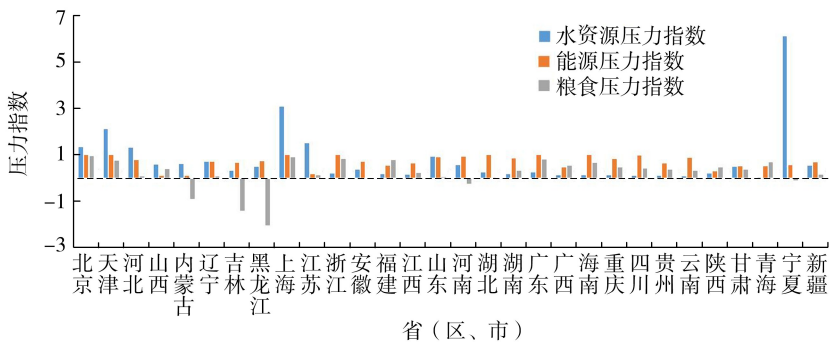


图 3 中国各省(区、市) WEf 资源压力指数

Fig. 3 WEf resource pressure index in various provinces/autonomous regions/cities of China

表 1 广东省与中国各省(区、市)间的 WEf 资源流动传递的风险值

Table 1 WEf resource risk transfer value between Guangdong Province and other provinces/autonomous regions/cities in China						
省(区、市)	体现水传递风险值		体现能源传递风险值		体现粮食传递风险值	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
北 京	0.000 125	-0.005 876	0.002 157	-0.009 747	0.009 617	-0.075 675
天 津	0	0.000 028	-0.001 943	0.014 428	-0.002 024	0.014 179
河 北	-0.000 110	0.002 689	-0.010 140	0.032 316	-0.017 896	0.022 659
山 西	0.000 009	-0.000 169	-0.003 478	0.001 230	-0.003 644	0.009 763
内 蒙	-0.000 101	0.001 696	-0.006 157	0.001 330	-0.003 674	0.007 695
辽 宁	-0.000 056	0.000 796	-0.006 663	0.019 180	-0.008 732	0.018 174
吉 林	-0.000 151	0.001 656	-0.004 320	0.022 234	-0.012 304	0.017 477
黑龙江	-0.000 106	0.001 462	-0.000 947	0.005 393	-0.002 758	0
上 海	-0.000 038	0.001 435	-0.003 823	0.008 455	-0.001 343	0.007 069
江 苏	-0.000 262	0.002 226	-0.005 569	0	-0.006 141	0.007 803
浙 江	0.000 231	-0.000 520	0.005 259	-0.013 185	0.015 749	-0.028 441
安 徽	-0.000 211	0.001 411	-0.003 787	0.012 801	-0.017 762	0.023 143
福 建	-0.000 098	0.000 210	-0.002 965	0.003 727	-0.006 518	0.017 906
江 西	-0.000 228	0.000 765	-0.003 452	0.013 773	-0.016 804	0.032 795
山 东	0.000 009	-0.000 086	-0.003 697	0.007 264	-0.005 551	0.005 207
河 南	-0.000 167	0.001 306	-0.009 042	0.027 345	-0.028 729	0.025 048
湖 北	-0.000 014	0.000 042	0.000 065	-0.000 225	0.000 389	-0.000 680
湖 南	-0.000 200	0.000 448	-0.004 211	0.012 263	-0.017 643	0.022 623
广 西	-0.000 449	0.001 178	-0.007 051	0.017 049	-0.028 612	0.062 217
海 南	-0.000 121	0.001 229	-0.002 497	0.066 524	-0.006 430	0.098 079
重 庆	0.000 010	-0.000 031	-0.001 293	0.006 271	-0.004 868	0.013 885
四 川	-0.000 020	0.000 026	-0.000 836	0.002 669	-0.008 115	0.008 417
贵 州	-0.000 128	0.000 357	-0.006 679	0.030 053	-0.016 823	0.050 557
云 南	0.000 023	-0.000 032	0.001 041	-0.005 493	-0.000 642	0.001 366
陕 西	-0.000 058	0.000 312	-0.004 887	0.005 192	-0.011 792	0.030 713
甘 肃	-0.000 058	0.001 644	-0.001 666	0.012 153	-0.005 939	0.021 407
青 海	0.000 001	-0.000 006	-0.000 158	0.003 559	0.000 198	-0.004 116
宁 夏	-0.000 021	0.016 294	-0.001 138	0.019 197	0.000 701	-0.010 248
新 疆	-0.000 073	0.001 189	0.000 630	-0.003 494	0.004 054	-0.012 606

注:(1)列代表 WEf 资源由广东省流向各省份产生的风险传递,(2)列代表资源由各省份流入广东省产生的风险传递。

资源流动均在较大程度上缓解了广东省 WEf 资源短缺风险。对比 3 类资源,体现能源和体现粮食贸易所产生的传递风险值显著高于体现水,其中体现粮食的(2)列风险值更高,说明体现粮食由各省份流入广东省产生的传递风险值更大;体现能源的风险传递波动性则更大。

由表 1、图 4 可知,体现水方面,22 个省份体现水输出增加的风险显著低于输入广东降低的风险,风险传递价值较高。类似的,存在较高风险传递价值的省份数在体现能源流动和体现粮食流动中分别为 21 个和 20 个,即省际 WEf 资源流动中,广东输入 WEf 降低的风险显著高于其输入对象增加的风险,整体 WEf 资源流动趋向于有序发展,未造成大范围的风险放大效应。北京、浙江、云南、新疆等少量省(区、市)的 WEf

风险传递价值较低,这些省份输入 WEF 资源降低的风险显著低于广东省输出资源增加的风险,即资源流动对输入地风险缓解的作用不显著。

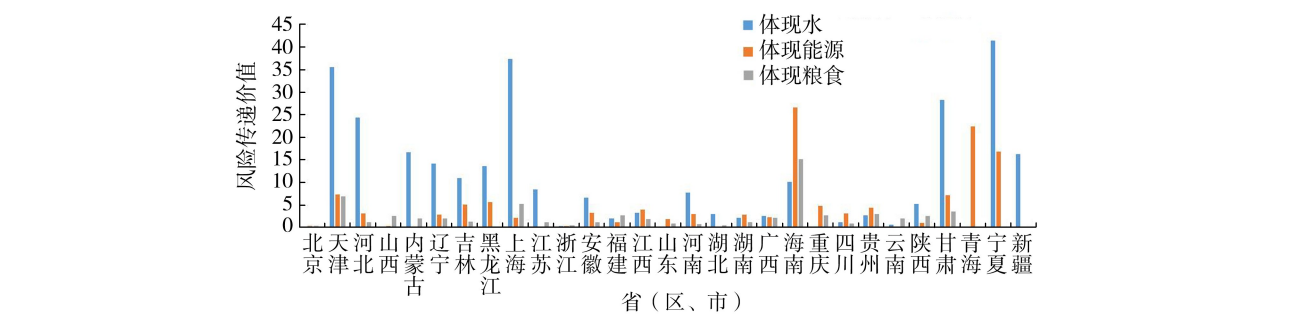


图 4 广东省与中国各省(区、市)间的 WEF 资源风险传递价值

Fig. 4 WEF resource risk transfer value between Guangdong Province and other provinces/autonomous regions/cities in China

对于风险传递价值较高的省份,以广东与海南之间的资源风险传递为例,广东省与海南省之间的体现水流动,使得广东省的风险值降低了 0.001 229 个单位,而海南省的风险值增加了 0.000 121 个单位,以风险传递价值的视角看,传递价值为 10.17,说明海南省的体现水输出对于本地水资源产生的压力较小,却相对较大程度缓解了广东的用水压力;同样,两省份之间体现能源流动的传递价值高达 26.64,体现粮食流动的传递价值高达 15.25。与此相似的还包括天津、上海、河南、甘肃等,同时具备较高的水资源、能源、粮食风险传递价值,对于此类省份,资源风险可通过贸易由资源压力较高地区转移至压力较低地区,因此应保持甚至促进广东省与这些省份之间的 WEF 资源贸易流动,以期平衡各地区因 WEF 资源流动所产生的风险,从而避免进一步的经济损失。对于风险传递价值较低的省份,以广东与云南之间的资源风险传递为例,广东与云南之间的体现水流动,使得广东省的风险值增加了 0.000 032 个单位,而云南省的风险值降低了 0.000 023 个单位,以风险传递价值的视角看,传递价值仅为 0.72,同样,体现能源的风险传递价值仅为 0.19。与此相似的还包括北京、山西、浙江等,同时具备较低的水资源、能源、粮食风险传递价值,这类资源贸易不利于平衡各地之间的资源流动风险,需在资源贸易中谨慎合作,并且重点关注贸易双方的资源利用效率,避免由风险传递而产生进一步的经济损失。

海南、天津、上海、河南、甘肃等与广东省存在较高风险传递价值的省份,均对广东省净流入 WEF 资源,以风险传递价值的视角看,应增强以上省份与广东之间的 WEF 资源贸易往来,鼓励广东调入 WEF 含量较高的产品和服务,但在生产实际中应充分考虑可行性。例如,天津和上海的 WEF 资源压力高于广东省,虽与广东省的 WEF 资源流动风险传递价值较高,但若天津和上海对广东的 WEF 资源流入高于一定临界值时,将对本地 WEF 资源产生较大压力,若压力水平持续增高,将逆转其与广东之间的 WEF 传递风险值,从而不利于平衡地区之间的资源流动风险。此外,风险传递价值对 WEF 资源贸易的启发,还可以从资源利用效率视角考虑。北京、山西、浙江等与广东之间的风险传递价值较低,除了山西的体现能源和体现粮食净流入广东省以外,广东省均对以上三省市的 WEF 资源呈净流出状态,当广东的资源密集型产业着力提升自身 WEF 资源利用效率时,同等产值产品的调出将伴随更少的资源,可在缓解流入地资源压力的同时,减轻对自身施加的资源压力,也可以理解为鼓励广东省向风险传递价值较小的省份调出 WEF 资源利用效率较高的产品,从资源消耗量和资源利用效率两个维度突破 WEF 流通引发的潜在风险传递。

3 结 论

- a. 中国绝大多数省份均对广东省净流入 WEF 资源,总计净流入 117.06 亿 m³ 体现水,2.80×10⁹ GJ 体现能源,1622.93 万 t 体现粮食,广西、河南、安徽、湖南对广东省有较大的 WEF 资源流入量,广东省对北京、浙江等少数省市净流出 WEF 资源。
- b. 广东省 WEF 资源的影响力系数和感应度系数均较低,在全国 WEF 资源贸易中的带动作用 and 影响力不强,且对整个经济系统资源消耗变化而产生的感应能力相对较弱。
- c. WEF 资源流动传递的风险值对于输入地区和输出地区并非是对称性的,省际 WEF 资源流动中,对于

大多数省份而言,广东省输入 WEF 资源降低的风险显著高于其输入对象增加的风险,风险传递价值较高,且以海南、天津、上海、河南、甘肃等为代表,云南、北京、山西、浙江的风险传递价值则相对较低。

参考文献:

[1] 张长征,沈婷,徐慎晖,等. 极端天气下特大型城市“水资源-能源-粮食”安全风险研究[J]. 水利经济,2023,41(1):55-61. (ZHANG Changzheng, SHEN Ting, XU Shenhui, et al. Study on the security risk of “water-energy-food” in mega cities under extreme weather[J]. Journal of Economics of Water Resources,2023,41(1):55-61. (in Chinese))

[2] 赵勇,常奂宇,桑学锋,等. 京津冀水资源-粮食-能源-生态协同调控研究Ⅱ:应用[J]. 水利学报,2022,53(10):1251-1261. (ZHAO Yong, CHANG Huanyu, SANG Xuefeng, et al. Research on the coordinated regulation of water resources-food-energy-ecology in Beijing-Tianjin-Hebei region Ⅱ: application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(10):1251-1261. (in Chinese))

[3] 吴兆丹,谈心阳,刘烨宁,等. “水资源-能源”纽带关系视角下西北地区能源产业可持续发展路径研究[J]. 水利经济, 2024,42(5):9-19. (WU Zhaodan, TAN Xinyang, LIU Yening, et al. Research on sustainable development path of energy industry in Northwest China from perspective of water-energy nexus[J]. Journal of Economics of Water Resources,2024,42(5):9-19. (in Chinese))

[4] 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))

[5] 李轶,万芬芬,张文龙. 长三角地区工业园区水资源高效利用的发展趋势与策略[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023, 51(3):1-9. (LI Yi, WAN Fenfen, ZHANG Wenlong. Development trend and strategy of efficient utilization of water resources for industrial parks in Yangtze River Delta Region[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3):1-9. (in Chinese))

[6] 王雨,王会肖,杨雅雪,等. 黑龙江省水-能源-粮食系统动力学模拟[J]. 水利水电科技进展,2020,40(4):8-15. (WANG Yu, WANG Huixiao, YANG Yaxue, et al. System dynamics simulation of WEF nexus in Heilongjiang Province[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(4):8-15. (in Chinese))

[7] 张中浩,张永瑶,胡娜娜,等. 基于“水-能源-粮食”纽带的生态系统服务供需关系时空分布研究:以长三角生态绿色一体化发展示范区为例[J]. 生态学报,2023,43(22):9430-9445. (ZHANG Zhonghao, ZHANG Yongyao, HU Yina, et al. Spatial and temporal distribution of supply-demand of ecosystem services in the demonstration zone of green and integrated ecological development of the Yangtze River Delta from the perspective of water-energy-food nexus[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22):9430-9445. (in Chinese))

[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] 曾萌,张园园,王红瑞,等. 中国水-能源纽带关系双向消耗核算研究[J]. 水资源保护,2022,38(5):159-165. (ZENG Meng, ZHANG Yuanyuan, WANG Hongrui, et al. Bidirectional consumption accounting of water-energy nexus in China[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5):159-165. (in Chinese))

[10] 李红芳,王会肖,赵茹欣,等. 基于 Copula 函数的水-能源-粮食共生安全风险概率[J]. 农业工程学报,2021,37(8):332-340. (LI Hongfang, WANG Huixiao, ZHAO Ruxin, et al. Estimating the symbiosis risk probability of water-energy-food using Copula function[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(8):332-340. (in Chinese))

[11] ZHANG Yinan, CHU Chunli, LI Tong, et al. A water quality management strategy for regionally protected water through health risk assessment and spatial distribution of heavy metal pollution in 3 marine reserves[J]. Science of the Total Environment, 2017, 599-600:721-731.

[12] GINGERICH D B, SUN Xiaodi, BEHRER A P, et al. Spatially resolved air-water emissions tradeoffs improve regulatory impact analyses for electricity generation[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114(8):1862-1867.

[13] RAPTIS C E, BOUCHER J M, PFISTER S. Assessing the environmental impacts of freshwater thermal pollution from global power generation in LCA[J]. Science of the Total Environment, 2017, 580:1014-1026.

[14] 王红瑞,钱龙霞,赵自阳,等. 水资源风险分析理论及评估方法[J]. 水利学报,2019,50(8):980-989. (WANG Hongrui,

QIAN Longxia,ZHAO Ziyang,et al. Theory and assessment method of water resources risk[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019,50(8):980-989. (in Chinese))

[15] 周李晶. 考虑供需风险的煤炭供应链优化研究[D]. 北京:华北电力大学(北京),2021.

[16] 崔宁波,生世玉. 现代种业高质量发展的战略意义、问题挑战与路径重塑[J]. 现代经济探讨,2022(2):94-102. (CUI Ningbo,SHENG Shiyu. Strategic significance,realistic challenge and path remolding of high quality development of modern seed industry[J]. Modern Economic Research,2022(2):94-102. (in Chinese))

[17] 李娜. 基于系统动力学和 Copula 函数的深圳市水-能关系综合效应与风险分析[D]. 深圳:深圳大学,2020.

[18] CHEN I C,WANG Y H,LIN W,et al. Assessing the risk of the food-energy-water nexus of urban metabolism:a case study of Kinmen Island,Taiwan[J]. Ecological Indicators,2020,110:105861.

[19] 贺祥,张新宇,林佳卉. 城市水-能源-粮食纽带系统资源流动过程风险分析[J]. 绿色科技,2022,24(4):231-236. (HE Xiang,ZHANG Xinyu,LIN Jiahui. Risk analysis of resource flow process in urban water-energy-food linkage system[J]. Journal of Green Science and Technology,2022,24(4):231-236. (in Chinese))

[20] 张盼. 粤港澳区域水能粮系统多维风险耦合机制与协同管控[D]. 广州:广东工业大学,2022.

[21] ZHANG Pan,ZHOU Ya,XIE Yulei,et al. Spatial transmission mechanism of the water,energy and food nexus risks for the Guangdong-Hong Kong-Macao region of China[J]. Journal of Cleaner Production,2023,405:136906.

[22] 梁颖珊,李湘姣,刘玥. 粤港澳大湾区广东省域城市水资源禀赋及开发利用分析[J]. 人民珠江,2024,45(5):10-18. (LIANG Yingshan,LI Xiangjiao,LIU Yue. Water resources endowment and development in nine cities of Guangdong Province under background of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Pearl River,2024,45(5):10-18. (in Chinese))

[23] 杜梦晴,杨欣. 碳中和背景下统筹土地利用碳收支的广东省横向碳补偿[J]. 水土保持学报,2024,38(1):197-206. (DU Mengqing,YANG Xin. Horizontal carbon compensation in Guangdong province based on coordinating land use carbon budget under the background of carbon neutrality[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(1):197-206. (in Chinese))

[24] 郑捷航. 新时代粮食安全背景下的广东省虚拟耕地研究[D]. 广州:华南理工大学,2020.

[25] CHENG Lei,TIAN Jinping,XU Haoge. Unveiling the nexus profile of embodied water-energy-carbon-value flows of the Yellow River Basin in China[J]. Environmental Science & Technology,2023,57(23):8568-8577.

[26] 邵玲. 体现水的多尺度投入产出分析及其工程应用[D]. 北京:北京大学,2014.

[27] 檀勤良,韩健,刘源. 基于投入产出模型的省际虚拟水流动关联分析与风险传递[J]. 中国软科学,2021(6):144-152. (TAN Qinliang,HAN Jian,LIU Yuan. Correlation analysis and risk transfer of provincial virtual water flow based on input-output model[J]. China Soft Science,2021(6):144-152. (in Chinese))

[28] 张明斗,席胜杰. 东北地区城市产业空间联系网络特征研究[J]. 地域研究与开发,2022,41(3):18-24. (ZHANG Mingdou,XI Shengjie. Characteristics of urban industrial spatial linkage network in northeast China[J]. Areal Research and Development, 2022,41(3):18-24. (in Chinese))

[29] ZHAO Xu,LIU Junguo,LIU Qingying,et al. Physical and virtual water transfers for regional water stress alleviation in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2015,112(4):1031-1035.

[30] 孙才志,张佳亮. 中国与“一带一路”沿线国家农产品贸易的水资源压力效应[J]. 水利水电科技进展,2023,43(4):1-8. (SUN Caizhi,ZHANG Jialiang. Effects of water resources stress on agricultural trade between China and countries along Belt and Road[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(4):1-8. (in Chinese))

[31] 洪思扬,王红瑞,梁俊芬,等. 京津冀地区水-能源利用效率与资源压力核算[J]. 水资源保护,2021,37(5):102-111. (HONG Siyang,WANG Hongrui,LIANG Junfen,et al. Calculation of energy-water utilization efficiency and resource pressure in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Water Resources Protection,2021,37(5):102-111. (in Chinese))

[32] 丁锐,史文娇,吕昌河,等. 气候变化背景下未来西藏粮食供需平衡状况预测[J]. 地理科学,2022,42(5):772-781. (DING Rui,SHI Wenjiao,LYU Changhe,et al. The impact of climate change on grain supply and demand balance in Tibet in the future [J]. Scientia Geographica Sinica,2022,42(5):772-781. (in Chinese))

[33] 起晓星,刘黎明,刘亚彬. 基于缺口率模型的区域粮食安全风险评估[J]. 农业工程学报,2013,29(9):1-8. (QI Xiaoxing, LIU Liming,LIU Yabin. Risk assessment for regional food security based on models of food supply-demand gap[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2013,29(9):1-8. (in Chinese))

[34] LIU Yating,CHEN Bin. Water-energy scarcity nexus risk in the national trade system based on multiregional input-output and network environ analyses[J]. Applied Energy,2020,268:114974.