

DOI: 10.20103/j.stxb.202405181142

赵良仕, 杨爽, 许淑婷. 基于投入产出的中国沿海地区水-能系统耦合研究. 生态学报, 2025, 45(6): 2851-2867.

Zhao L S, Yang S, Xu S T. Coupling study of water-energy system in China's coastal areas based on input-output analysis. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(6): 2851-2867.

基于投入产出的中国沿海地区水-能系统耦合研究

赵良仕¹, 杨爽¹, 许淑婷^{2,*}

¹ 辽宁师范大学海洋可持续发展研究院, 大连 116029

² 辽宁师范大学地理科学学院, 大连 116029

摘要: 随着中国沿海地区经济迅速发展和人口急剧增长, 水和能源需求大幅攀升, 沿海地区面临严峻的水和能源短缺挑战。将水和能源看作一个整体系统, 研究水-能系统耦合对制定水-能协同管理政策、实现区域可持续发展具有重要意义。目前水-能系统的研究逐渐丰富, 但从虚拟水和隐含能流动视角下结合投入产出分析和耦合协调度模型探讨水-能系统耦合的研究较少。采用投入产出分析模型测度了虚拟水和隐含能的流动、水和能源的利用效率以及用水和能耗的拉动效应; 从用水与能耗的相对系数和相对乘数两方面研究了水-能系统关联, 分析沿海各省各部门相对于沿海地区整体水平下的水-能联系强度; 考虑耦合网络中各省各部门的虚拟水和隐含能流动特性, 利用耦合协调度模型衡量水-能系统耦合协调状态。研究发现: (1) 虚拟水净流入的 5 个省同样是隐含能的净流入省, 包括广东、浙江、天津、山东和福建, 此外海南也是隐含能的净流入省。农业、建筑业是虚拟水流动关键部门, 建筑业是隐含能流动关键部门。主要能源部门中炼焦(石油加工和炼焦)是与用水密切相关的关键领域, 针对各省在水部门耗能方面存在的差异政府应采取不同的措施。(2) 各省水生产供应业均呈现 HwHe 的特点, 生产过程中应同时注重节水节能, HwLe、LwHe 部门应分别将节水与节能作为缓解资源压力的重点。(3) 建筑业(SwSe)的用水和能耗相对乘数均远高于沿海地区平均水平, 与其他部门表现出强烈的水-能联系, 是节水和节能的关键部门。(4) 沿海地区各部门水-能系统的耦合协调水平都处于协调发展状态, 但结合水-能利用效率和拉动效应划分, 各部门耦合协调发展水平存在一定差异, 需采取针对性措施以协调水和能源利用关系、部门间拉动效应及虚拟水和隐含能的流动。本文旨在为沿海地区水-能协同管理政策的制定提供参考。

关键词: 投入产出分析; 水-能系统关联; 耦合协调度; 沿海地区

Coupling study of water-energy system in China's coastal areas based on input-output analysis

ZHAO Liangshi¹, YANG Shuang¹, XU Shuting^{2,*}

¹ Institute of Marine Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

² School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

Abstract: As the economy develops rapidly and the population grows in the coastal areas of China, the region's water and energy demand has surged sharply, and the coastal areas are facing severe water and energy shortages. Considering water and energy as a intergrated system, it is of great significance to study the coupling of water and energy systems to formulate water-energy co-management policies and achieve regional sustainable development. At present, the research of water-energy system is becoming more comprehensive, but there are few researches on water-energy system coupling from the perspective of virtual water and embodied energy flow, combined with input-output analysis and coupling coordination degree model. In

基金项目: 教育部人文社会科学重点研究基地重大项目(22JJD790028); 辽宁省教育厅高等学校基本科研项目课题(LJ112410165076)

收稿日期: 2024-05-18; **网络出版日期:** 2024-12-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xushuting2020@163.com

#限于数据的可获取性, 本研究尚未含中国港澳台统计数据。

this paper, the flow of virtual water and embodied energy, the utilization efficiency of water and energy, and the pulling effect of water use and energy consumption are calculated with the help of input-output analysis. Next, water-energy system nexus is studied from the aspects of the relative coefficient and relative multiplier of water use and energy consumption, and analyzes the intensity of water-energy nexus of each sector relative to the overall level of coastal areas. Finally, considering the virtual water and embodied energy flow characteristics of each province and department in the coupling network, the coupling coordination degree model is used to measure the coupling coordination state of the water-energy system. The results show that: (1) The five provinces and cities with virtual water net inflow are also net inflow provinces with embodied energy, including Guangdong, Zhejiang, Tianjin, Shandong and Fujian, and Hainan is also a net inflow province with embodied energy. Agriculture and construction are the key sector of virtual water flow, and the construction industry is the key sector of embodied energy flow. Among the major energy sectors, coking (petroleum processing and coking) is a key area closely related to water use, according to the differences in energy consumption of water sector in different provinces, the government should take different measures. (2) The water production and supply sector in all provinces exhibits HwHe traits, indicating that conservation efforts for water and energy should be pursued concurrently during production. Meanwhile, sectors identified as HwLe and LwHe should prioritize water and energy conservation to mitigate resource strain. (3) The construction industry (SwSe), which has a much higher relative water and energy consumption multiplier than the average in coastal areas, shows strong water-energy nexus with other sectors, and is a key sector for water and energy conservation. (4) The coupling and coordination level of water-energy systems in various sectors in coastal areas is in a state of coordinated development, but there are certain differences in the coupling and coordinated development level of various sectors in combination with the division of water-energy use efficiency and pulling effect, and targeted measures need to be taken to coordinate the relationship between water and energy use, the pulling effect between sectors and the flow of virtual water and embodied energy. This paper aims to provide a reference for the formulation of water-energy co-management policies in coastal areas.

Key Words: input-output analysis; water-energy nexus; coupling coordination degree; coastal areas

水资源和能源是人类社会发展过程中不可或缺的两类重要资源,两者在生产和消费过程中存在复杂而密切的联系,能源的开采、利用需要消耗水资源,水资源的提取、处理与分配等环节也离不开能源的支撑与保障。水-能系统关联(water-energy nexus, WEN)有利于反映水和能源需求之间的联系,包括水耗能源^[1]、能源耗水^[2]双向消耗。水-能系统关联研究在统一框架下评价了水资源利用和能源消耗的区域和部门差异^[3],不仅有利于理解两种资源之间的潜在依赖,提高当地资源利用效率,还有利于实现水资源和能源消耗之间的权衡。随着经济的快速发展和人口的急剧增长,沿海地区的水资源和能源需求急剧增加,导致水资源的过度开发和能源的高消耗,水资源短缺和能源结构不合理的问题日益突出,成为制约沿海地区发展的最大瓶颈^[4]。此外,沿海地区的工业化进程加快,导致水污染和生态环境恶化,进一步影响水资源的可持续利用。新质生产力^[5]的提出强调了在资源利用效率和环境保护之间的平衡,要求在水和能源的开发利用中,采用更为高效和环保的技术。因此,研究水-能系统耦合,探索如何在保障经济发展的同时,实现水资源和能源的可持续利用,成为沿海地区亟待解决的重要课题。这不仅有助于促进沿海地区水-能协同管理,还能为实现可持续发展提供理论支持和实践指导。

近年来,学者对水-能系统做了大量研究,在研究内容上,主要集中在两个方面,首先是资源足迹。如王菲等^[6]研究了东北三省虚拟水足迹-能源足迹及其空间转移变化;郝帅等^[7]测度了中国省际煤炭水足迹,并分析了其时空流动特征;李雪琴等^[8]核算了粮食与能源生产的蓝水足迹,分析“水-能”、“水-粮”资源空间适配格局及其动态演化趋势;刘秀丽等^[9]基于能-水耦合视角评价了山西省不同产业的能-水足迹效率。其次是资源的直接和间接消耗。如Li等^[10]量化了京津冀城市群能源部门用水量和水部门能耗量;洪思扬等^[11]从国际及

省际贸易视角量化水资源、能源以及两种资源相互消耗量;还有研究通过“混合水资源”和“混合能源”的概念开展水-能系统关联研究^[12-17];学者王菲等^[18]对黄河流域九省区水-土-能-碳等多资源消耗及流动进行了核算,并分析了其关联系统的网络特征;尤增涛等^[19]基于投入产出表数据和各行业水资源消耗和能源消耗数据,从碳水双重约束的视角结合产业关联指标开展了河南省产业结构优化研究。在研究方法上,众多学者将生态网络分析(ENA)与多区域投入产出模型相结合构建水-能系统耦合网络^[12-13,15-17]。Spearman 相关系数、消耗系数等方法也被广泛应用在量化系统耦合^[20]的研究中。如学者邓光耀等^[21]测算了中国各省各部门隐含能源和虚拟水消耗量、进出口量及水-能联系强度;Cheng 等^[22]采用 Spearman 相关系数分析隐含水、能源、碳和增加值的两两相关关系;王保乾等^[23]同样运用该系数分析了长江经济带省际贸易隐含水-能-碳耦合关系;学者 Wang 等^[24]借助部门水资源、能源间接消耗系数和碳间接排放系数总结贸易隐含水-能-碳耦合特征;彭辉等^[25]通过水部门与能源、能源部门与水的直接关联和完全关联分析了京津冀地区水-能系统关联,并核算了水-能协同节约效益;郑靖伟等^[26]测算了水/能源生产部门单位产出消耗的能源/水资源/碳排放量。

随着中国沿海地区经济迅速发展和人口急剧增长,沿海地区对水和能源的高需求导致当地的水资源和能源供给严重不足,必须依赖外部的资源流入,表现为虚拟资源流动。虚拟资源(Virtual Resources)是从虚拟水中引伸出来的新概念,指在贸易网络中,资源既可以按照原有形态直接流动,也可以被转换成各种附加值的产品间接流动^[20,27]。虚拟水和隐含能是两种代表性的虚拟资源。虚拟水是指生产产品或服务中所需要的水资源总量,包括直接和间接耗水^[28]。隐含能表示产品或服务在加工、制造和运输过程中消耗的总能量,包括直接和间接使用的能源^[29]。虚拟水和隐含能的流动量是体现这种供需关系的重要指标。通过分析虚拟水和隐含能的流动,可识别出虚拟资源在多区域多部门流动过程中的关键节点,明确技术创新的方向和重点是节水还是节能。综合以上分析来看,已有研究从多方法、多视角对水-能系统进行分析,但目前基于虚拟水、隐含能概念将投入产出分析和耦合协调度模型相结合的研究较少。因此,本文考虑耦合网络中各省各部门的虚拟水和隐含能流动特性,利用耦合协调度模型衡量省市-部门尺度水-能系统的耦合协调发展水平。首先,基于投入产出分析方法测度沿海地区省市-部门尺度上的虚拟水和隐含能的流动、利用效率(Utilization efficiency)及拉动效应(Pulling effect)。其中,利用效率是衡量每个部门单位产出消耗的水资源/能源总量的重要指标^[30],拉动效应即该部门产出对其他部门水资源/能源使用的带动作用^[31]。其次,从用水和能耗相对系数和相对乘数两方面分析沿海地区各部门的水-能系统关联,根据沿海地区的水-能联系强度平均值对其进行分类,识别沿海地区节水节能的关键部门,为水-能系统研究提供了新视角。最后,通过将虚拟水、隐含能流动量作为水-能系统耦合的评价指标,提供了对水-能系统耦合机制的更深入理解。研究旨在促进省市-部门间的水-能系统协同,推动沿海地区发展新质生产力。

1 计算方法与数据来源

1.1 研究方法

1.1.1 投入产出分析

多区域投入产出模型最早由 Isard^[32]提出,依赖于区域经济投入产出表和区域间贸易矩阵,引入水和能源的消耗量可追踪一个地区的消费活动所产生的资源流,反映经济系统内各省各部门间的产品流动联系,有助于量化沿海地区各省各部门在水-能系统中的资源利用及水和能源的流动模式,理解水资源和能源如何通过供应链在多区域多部门间流动及在这些过程中的角色和影响。模型中包含 m 个省,每个省有 n 个部门,可由下列等式表示:

$$x_i^r = \sum_{s=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij}^{rs} + \sum_{s=1}^m f_i^{rs} \quad (1)$$

式中, x_i^r 为 r 省 i 部门的总产出, x_{ij}^{rs} 为 r 省 i 部门供给 s 省 j 部门的中间投入, f_i^{rs} 为 r 省 i 部门对 s 省最终需求的投入。

A 为直接消耗系数, $A = a_{ij}^{rs}$, 表示 s 省 j 部门生产单位产品时 r 省 i 部门产品对其的直接投入:

$$a_{ij}^{rs} = \frac{x_{ij}^{rs}}{x_j^s} \quad (2)$$

式中, x_j^s 为 s 省 j 部门的总产出。

用矩阵表示为 $X = AX + F$, 变形得到:

$$X = (I - A)^{-1} F \quad (3)$$

式中, A 为 $mn \times mn$ 矩阵, 表示直接消耗系数, I 为单位矩阵, $(I - A)^{-1}$ 为里昂惕夫逆矩阵, X 表示总产出, F 表示最终需求, 都为 $mn \times 1$ 向量。

1.1.2 基于投入产出分析的相关计算

(1) 虚拟水和隐含能流动量

量化虚拟水和隐含能流动可以体现水和能源在各省各部门之间流动的方向和数量, 虚拟水或隐含能流动量的计算公式为:

$$U_{ij}^{rs} = k_i^r (I - A)^{-1} \times F_{ij}^{rs} \quad (4)$$

式中, U_{ij}^{rs} 表示 r 省 i 部门向 s 省 j 部门的虚拟水或隐含能流动量, k_i^r 为 r 省 i 部门的直接用水或能耗系数, F_{ij}^{rs} 表示 s 省 j 部门对 r 省 i 部门的最终需求。

(2) 利用效率

水和能源的利用效率可通过完全用水或能耗系数体现。首先, 通过引入各省各部门生产过程中的用水量或能耗量计算直接系数。直接用水或能耗系数 k_i^r 表示 r 省 i 部门生产单位产品消耗 i 部门的直接用水量或能耗量, 完全用水或能耗系数 V_i^r 表示部门 i 每增加单位最终需求导致直接和间接用水或能耗的总和, 即 i 部门单位产品(以产值表示)所含的虚拟水或隐含能, 计算公式为:

$$k_i^r = \frac{(w, e)_i^r}{x_i^r} \quad (5)$$

$$V_i^r = k_i^r (I - A)^{-1} \quad (6)$$

式中, x_i^r 为 r 省 i 部门的总产出, w_i^r 和 e_i^r 为 r 省 i 部门生产所需直接用水量或能耗量。

间接系数 M 表示每个部门单位经济产出的间接水资源或能源消耗, 这些水资源或能源来自其他部门的投入, 等于完全系数与直接系数之差。

$$M = V - K \quad (7)$$

(3) 拉动效应

用水和能耗的拉动效应可通过间接用水或能耗乘数估算。间接乘数可以反映某部门每增加一个单位直接消费而导致整个经济系统间接水资源或能源消耗的增加。间接乘数等于 0 表示该部门与其他部门之间不存在联系, 用水和能耗量主要来自该部门本身, 乘数越大表示联系越强, 其计算公式为:

$$p_i^r = \frac{m_i^r}{k_i^r} \quad (8)$$

1.1.3 水-能系统关联

通过完全用水系数、完全能耗系数两个指标衡量水-能系统关联的资源利用效率, 将各个部门划分为高用水-高能耗 HwHe、高用水-低能耗 HwLe、低用水-高能耗 LwHe 和低用水-低能耗 LwLe 四类:

$$\delta_{i(w,e)}^r = \frac{v_{i(w,e)}^r}{\bar{v}_{(w,e)}} \quad (9)$$

式中, $v_{i(w,e)}^r$ 表示 r 省 i 部门的完全用水系数或完全能耗系数, $\bar{v}_{(w,e)}$ 表示沿海 11 个省市共 330 个部门完全用水系数或完全能耗系数的平均值。 $\delta_{i(w)}^r$ 为各部门相对于沿海地区平均水平下的相对用水系数, 当大于 1 时, 表明 r 省 i 部门单位经济产出的总用水量超过沿海地区所有部门的平均水平, 该部门为高用水部门, 反之亦然。

同样的分类用于能源消耗衡量。

通过间接用水乘数、间接能耗乘数两个指标衡量水-能系统关联的拉动效应方面,将各个部门划分为强水-强能连接 $SwSe$ 、强水-弱能连接 $SwWe$ 、弱水-强能连接 $WwSe$ 和弱水-弱能连接 $WwWe$ 四类:

$$\varphi_{i(w,e)}^r = \frac{P_{i(w,e)}^r}{\bar{P}_{(w,e)}} \tag{10}$$

式中, $p_{i(w,e)}^r$ 表示 r 省 i 部门的间接用水系数或间接能耗乘数, $\bar{p}_{(w,e)}$ 表示 11 个省市共 330 个部门间接用水系数或间接能耗系数的平均值。 $\varphi_{i(w)}^r$ 为各部门相对于沿海地区平均水平下的相对用水乘数,当大于 1 时,表明 r 省 i 部门与其他部门之间的水资源联系强度超过沿海地区所有部门的平均水平,该部门为强水连接部门,反之亦然。同样的分类用于能源联系强度的衡量。

1.1.4 水-能系统耦合协调度

耦合协调度模型被广泛应用于直观量化系统耦合协调状态的研究中。本文引入耦合协调度模型反映系统省市-部门尺度的水-能系统耦合强弱及协调水平高低,以评价水-能系统的耦合协调发展程度。本文涉及水资源、能源两个系统,故可采用如下公式:

$$C = \frac{2\sqrt{f(x)g(y)}}{f(x)+g(y)} \tag{11}$$

$$D = \sqrt{C \times T} \tag{12}$$

$$T = \sqrt{f(x)+g(y)} \tag{13}$$

式中: D 表示耦合协调度, C 表示耦合度, T 表示水资源、能源两个子系统的综合评价指数。借鉴王兆华等^[33]和王风初等^[34]的研究,水资源子系统包含万元产出用水、水资源开发利用率(部门用水量/当地可用水资源总量)和虚拟水净流入量三个指标,能源子系统包含万元产出能耗、能源开发利用率(部门能耗量/可供本地区消费的能源量)和隐含能净流入量三个指标。

1.2 数据来源

沿海地区的投入产出数据来自 2017 年中国多区域投入产出表,将投入产出部门按照省级能源清单的部门以及 2011 国民部门分类标准进行一一对应匹配,虚拟水部门采用同样分类,本文合并为 30 个部门(表 1)。

表 1 各部门及其代码

Table 1 Sectors and their codes

代码 Code	部门 Sector	代码 Code	部门 Sector	代码 Code	部门 Sector
01	农林牧渔产品和服务	11	石油、炼焦产品和核燃料加工品	21	仪器仪表
02	煤炭采选产品	12	化学产品	22	其他制造产品
03	石油和天然气开采产品	13	非金属矿物制品	23	电力、热力的生产和供应
04	金属矿采选产品	14	金属冶炼和压延加工品	24	燃气生产和供应
05	非金属矿和其他矿采选产品	15	金属制品	25	水的生产和供应
06	食品和烟草	16	通用设备	26	建筑
07	纺织品	17	专用设备	27	交通运输、仓储和邮政业
08	纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品	18	交通运输设备	28	批发、零售业和住宿、餐饮业
09	木材加工品和家具	19	电气机械和器材	29	其他部门
10	造纸印刷和文教体育用品	20	通信设备、计算机和其他电子设备	30	生活消费

各部门用水量数据:农林牧渔部门用水量数据来自《中国统计年鉴 2018》中的农业用水量;工业和第三产业各部门用水数据由投入产出表中“水的生产和供应业”在不同省份不同部门的中间投入为比例分配工业用水量和第三产业用水量得到。各部门能源消耗数据:本文选择煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天

然气和电力 9 种主要能源产品消费量计算中国 30 个省份 30 个部门的直接能源消耗,该数据来源于中国碳核算数据库 CEADs(不包括西藏及港澳台),根据《中国能源统计年鉴》提供的能源换算为标准煤的系数,将各种能源的消耗量换算为万 t 标准煤。

2 结果分析

2.1 虚拟水和隐含能流动量

虚拟水和隐含能流入流出情况是研究水和能源系统耦合的重要依据(图 1)。沿海 11 省市间虚拟水净流量为 86.21 亿 m³,天津、浙江、福建、山东和广东的虚拟水流入量大于其流出量,其中广东、浙江虚拟水净流入量最大,分别为 30.82 亿 m³、19.07 亿 m³,占净流入总量的 81%。除上述 5 省外,其余省均为虚拟水净流出省,广西、江苏是主要的净流出省。沿海地区虚拟水流动中最大的两条虚拟水流连接为广西-广东、江苏-浙江,分

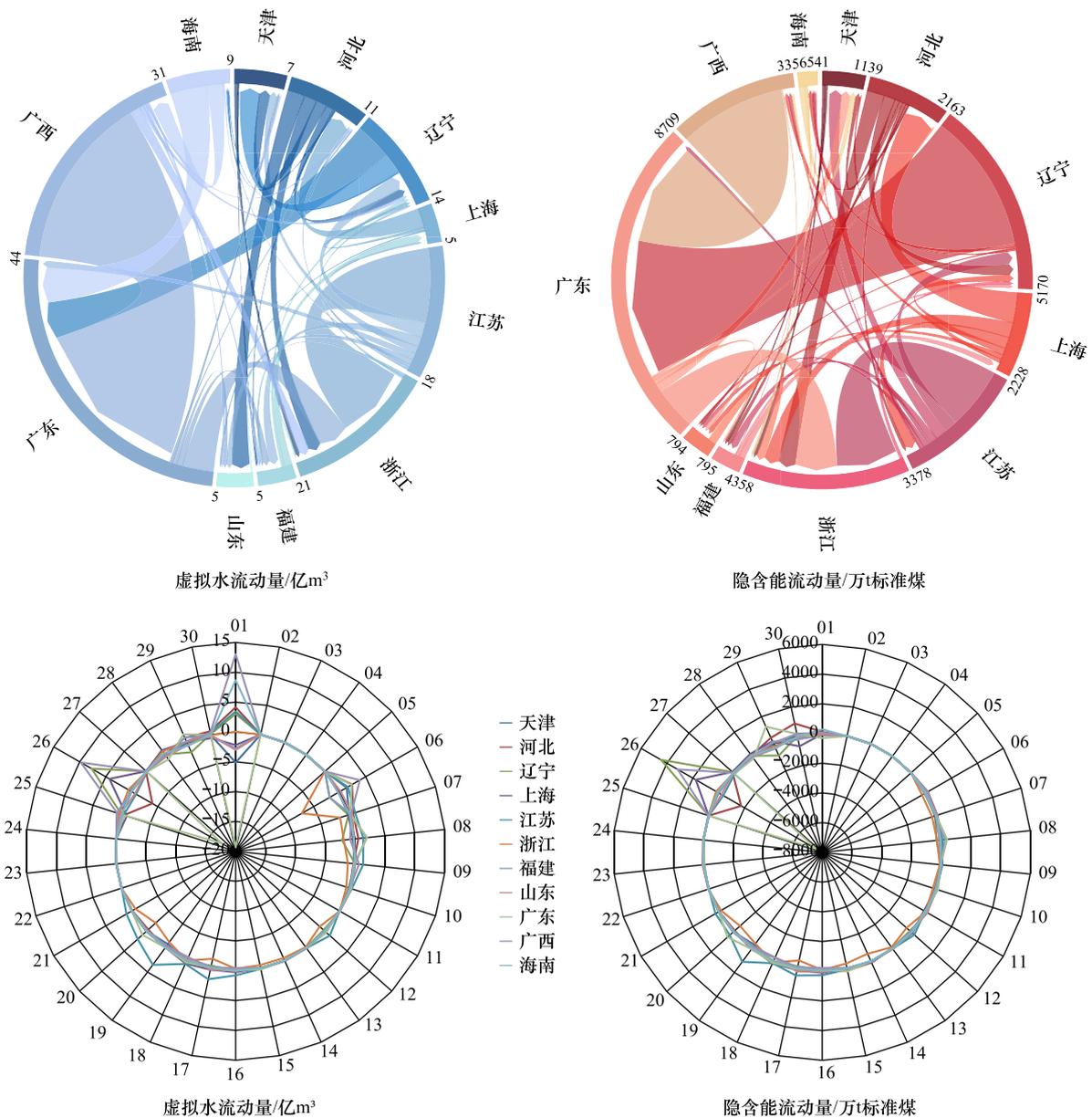


图 1 沿海地区及其各部门虚拟水、隐含能流动

Fig.1 Virtual water and embodied energy flows in coastal areas and their sectors

01—30 部门代码同表 1

别隐含了 25.60 亿 m^3 、11.04 亿 m^3 的水资源流动。隐含能净流动总量为 16316 万 t 标准煤,虚拟水净流入的五个省同样是隐含能的净流入省,此外海南也是隐含能的净流入省,流动量较小,仅 18 万 t 标准煤,辽宁是主要的隐含能流出省,辽宁-广东蕴含着最大的隐含能流动,达 3914 万 t 标准煤,广西-广东、江苏-浙江也伴随着巨大的隐含能流动,分别为 2973 万 t、1740 万 t 标准煤。虚拟水和隐含能净流入省主要集中在东部沿海地区,它们倾向于从其他省调入大量水资源密集型和能源密集型产品。

从部门上看,农业(01)是虚拟水流动量最大的部门,其次为食品和烟草(06)、建筑业(26),虚拟水流动量分别为 43.31 亿 m^3 、29.60 亿 m^3 和 23.29 亿 m^3 。作为最大的虚拟水流入省份,广东超过 80%的水资源量是来自农业(19.31 亿 m^3)、建筑业(17.31 亿 m^3),广西、辽宁和上海的建筑业出口水密集型产品贡献了大量的虚拟水。建筑业(26)是隐含能流动量最大的部门,其隐含能流动量达 10153 万 t 标准煤,占沿海地区隐含能流入总量的 30%,第三产业在贸易中也伴随着大量的隐含能流动,开采和洗选相关部门隐含的能源流动量较少。各部门虚拟水、隐含能流动情况表明,农业、建筑业是虚拟水流动关键部门,建筑业是隐含能流动关键部门。

2.2 主要水/能源部门的能耗/用水

基于上述分析,本文参考学者 Li 等^[10]的研究重点分析了五个主要能源部门的水:煤炭(煤炭开采和选矿)、采掘(石油和天然气开采)、炼焦(石油加工和炼焦)、电力(电力、蒸汽和热水的生产和供应)和天然气(天然气的生产和供应),以及“水生产与供应”部门的能。该角度的分析(图 2)旨在更全面地解析水-能耦合关系,为资源管理和政策制定提供更具针对性的建议。

在以生产为基础的能源用水分析中,山东和浙江主要能源部门在虚拟水流出方面分别位居前两位,海南的主要能源部门流出的虚拟水量最少。炼焦(石油加工和炼焦)是主要能源领域流出虚拟水最多的部门,其中山东、辽宁和浙江的该部门分别流出 637 万 m^3 、557 万 m^3 和 543 万 m^3 的虚拟水,而上海的流出量最少,约 15 万 m^3 。在电力(电力、蒸汽和热水的生产和供应)方面,辽宁、浙江、福建和山东的虚拟水流出量相近。在采掘(石油和天然气开采)方面,山东的虚拟水流出量(80 万 m^3)远远超过其他省,其次是天津(29 万 m^3)。在煤炭(煤炭开采和选矿)方面,山东的该能源部门(88 万 m^3)拥有最大的虚拟水流出量。在天然气(天然气的生产和供应)方面,广东、浙江和山东分别为 202 万 m^3 、145 万 m^3 和 108 万 m^3 ,居前三位。从流入角度看,广东和上海是能源领域最大的取水者。能源领域的消费用水主要由炼焦(石油加工和炼焦)驱动,如上海、江苏和浙江占其主要能源部门虚拟水流入总量的比例分别为 52%、60%和 71%。广东和河北的主要能源部门的虚拟水流入中,采掘(石油和天然气开采)是主要部门,其虚拟水流出量分别为 734 万 m^3 和 363 万 m^3 ,占比达 90%和 65%。

在以生产为基础的水耗能源方面,广西的水生产与供应部门是最大的隐含能流出部门,为 25 万 t 标准煤,其次是广东和浙江,分别为 19 万 t 标准煤和 14 万 t 标准煤。在水部门消费能源方面,广东(25 万 t 标准煤)超过江苏(19 万 t 标准煤)和河北(14 万 t 标准煤)成为最大的隐含能流入省份,表现出对能源的较高依赖。

综合来看,主要能源部门中炼焦(石油加工和炼焦)是与用水密切相关的关键领域。优化炼焦过程中的水资源管理和能效提升应成为实现可持续发展的重要任务。此外,针对各省在水部门耗能方面存在的差异应采取不同的措施。如广西可以优化水资源管理流程,提升能源使用效率,以减少隐含能流出;广东应加强水资源管理和节能技术的应用,减少能源消耗,并考虑引入更多可再生能源,以降低对传统能源的依赖,以实现能源的高效利用和可持续发展。

2.3 利用效率与拉动效应

水和能源的利用效率可由完全用水(能耗)系数 $V_w(e)$ 、直接用水(能耗)系数 $K_w(e)$ 、间接用水(能耗)系数 $M_w(e)$ 反映,用水与能耗系数越低,利用效率越高。拉动效应则由用水(能耗)拉动系数 $P_w(e)$ 反映(图 3)。上海的完全用水系数最高,直接用水系数表现出同样的特征,这主要由水生产供应业的高用水导致。第二为福建,其完全用水系数是山东(完全用水系数最小)的 5 倍。间接用水系数上表现为上海最高,山东、天津和广东等省市的间接用水系数范围在 600—900 m^3 /万元。

能耗系数上表现为海南最高,上海最低。主要体现在海南的各能耗系数均最高(V_e 达 101.02t/万元),完

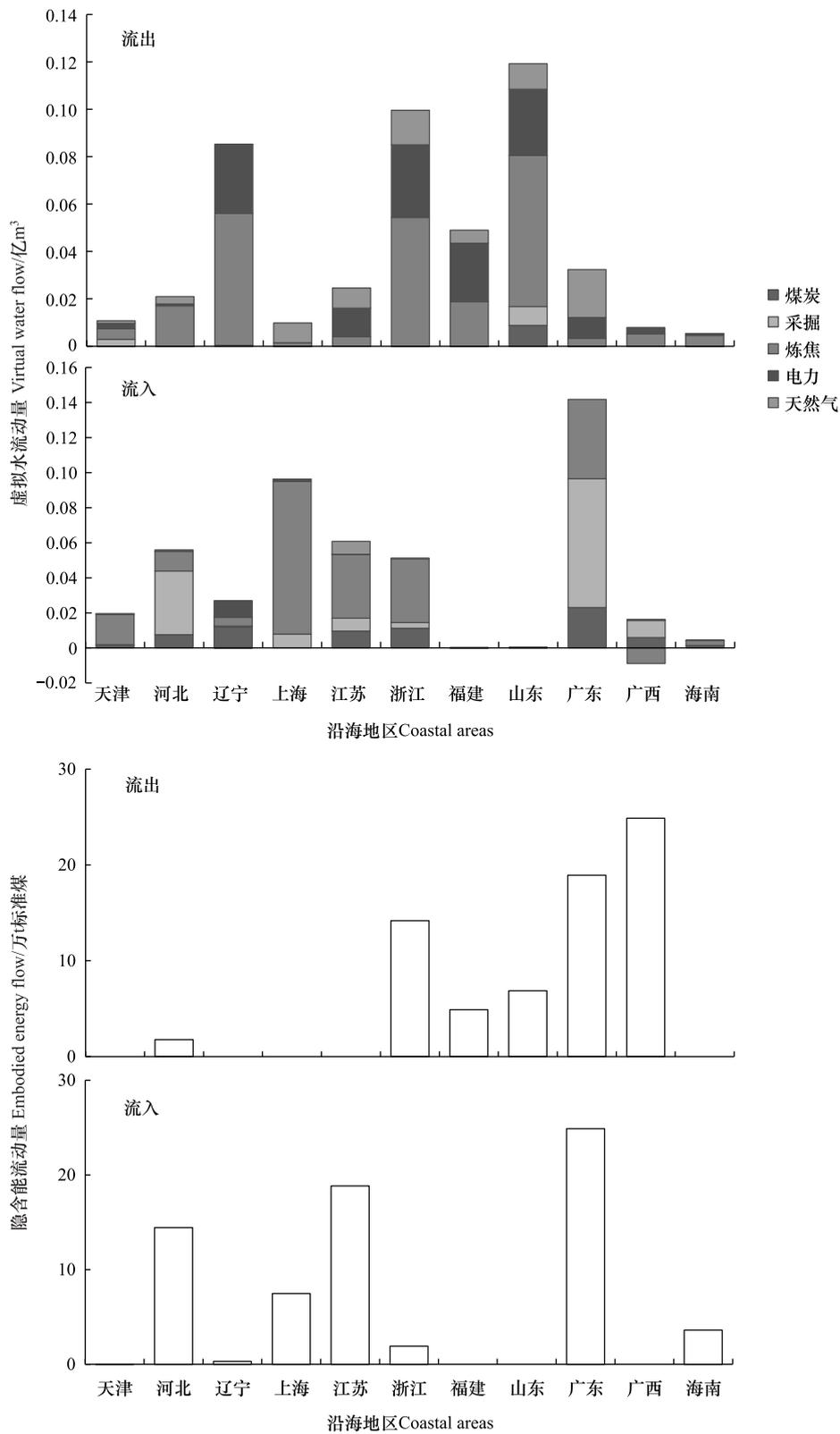


图2 主要能源部门的虚拟水流出和流入情况、水部门的隐含能流出和流入情况

Fig.2 Virtual water outflow and inflow in the main energy sector, embodied energy outflow and inflow in the water sector

全能耗系数和间接能耗系数上表现为上海最低,直接能耗系数上表现为天津最低。除海南、辽宁外,其余省的间接能耗系数大于直接能耗系数,它们需要大量来自其他省的能源密集型产品用作中间投入。

拉动系数反映了每增加单位直接用水或能耗投入,导致产业链用水或能耗增加的程度,即该省或部门的拉动效应。从各省用水拉动系数来看,山东的系数值最高达 1.60,与其他省份的用水联系最为密切。具体而言,山东每增加单位直接用水量,最大程度地增加了其他省份的水资源投入,使沿海地区的总用水量急剧增加。能耗拉动系数上,天津的系数值最高达 1.97,其次为广东和山东。海南的能耗拉动系数最低,仅为天津系数值的 35%,表明海南的能源部门与其他省的中间环节较少。

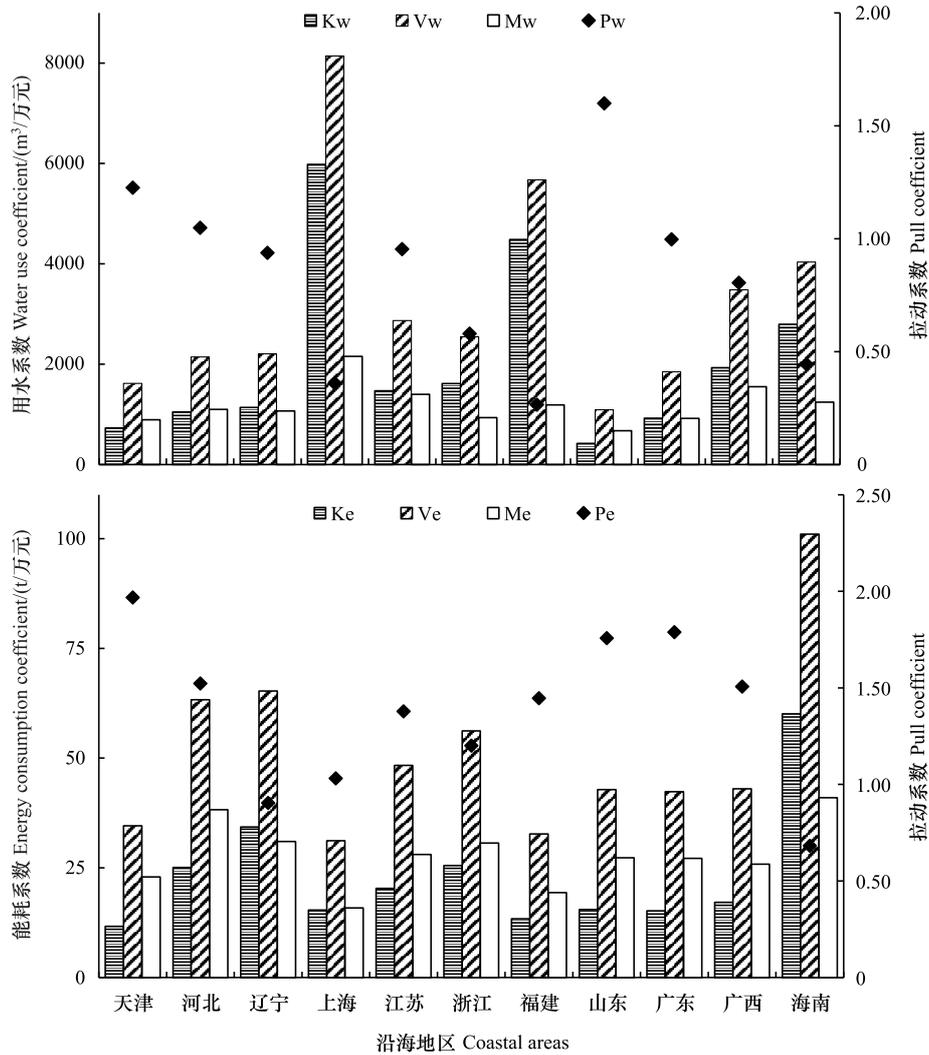


图3 沿海地区用水系数和能耗系数及其拉动系数

Fig.3 Water use coefficient and energy consumption coefficient and pull coefficient of coastal areas

Kw(e):直接用水(能耗)系数;Vw(e):完全用水(能耗)系数;Mw(e):间接用水(能耗)系数;Pw(e):用水(能耗)拉动系数

各部门用水和能耗系数及其拉动系数可揭示部门水和能源消耗情况和联系(图4)。直接用水系数反映了该部门单位经济产出的直接用水量,农业(01)是沿海地区直接用水最大的部门,达 4057.09m³/万元。食品和烟草(06)、纺织业(07)和木材加工和家具部门(08)等初级制造业都属于高耗水部门。完全用水系数反映了该部门单位经济产出对水资源的全部需求,与直接用水系数相似,完全用水系数表现为农业大于工业,工业部门中的水生产供应业(25)的完全用水系数最大,最小的为石油炼焦加工业(11)。上述这些部门的直接用水系数较大,间接用水却远小于直接用水。第三产业和大多数工业部门的间接用水占完全用水的 80%以上,其直接用水系数虽然较低,但完全用水远大于直接用水,这些部门产品或服务生产过程中需要较多水密集型产品的中间投入。

工业能源消耗总体上大于农业和第三产业。金属冶炼和压延加工业(14)能耗系数最高,电力热力(23)、水的生产供应业(25)和煤炭采选业(02)等传统能源部门的能耗系数也较高,说明很可能存在以过度能源消耗为代价的“粗放式”经济增长模式。上述部门的完全能耗系数表现为最高,范围在 28—40t/万元值之间,农业的完全能耗系数仅为 7.28t/万元。一些器械设备部门如专用设备(17)、电气机械和器材(19)等以及建筑业(26)间接能耗占总能耗的 80%以上,间接能耗远高于直接能耗,主要是因为这些部门属于产业链下游部门,其生产和服务过程需要依赖大量的隐含能投入。

第三产业的用水系数表现出强拉动的特点,食品烟草业(06)、木材加工业(09)等工业部门也有较高的用水拉动系数,系数值分别为 21.87、14.87,这些部门每增加单位直接用水量都很大程度地增加来自其他部门的水资源投入,使沿海地区总用水量急剧增加。农业(01)的用水拉动系数接近于 0,间接用水与总用水之间的中间环节较少。建筑业(26)的能耗拉动系数最高达 20.81,该部门与其他部门联系最为密切,每增加单位直接能耗量都大幅增加了来自其他部门原材料的中间投入,使沿海地区总能耗量急剧增加。除建筑业外,能耗的拉动系数与用水相比,各部门拉动系数值比较平均,主要在 0—7 之间波动。

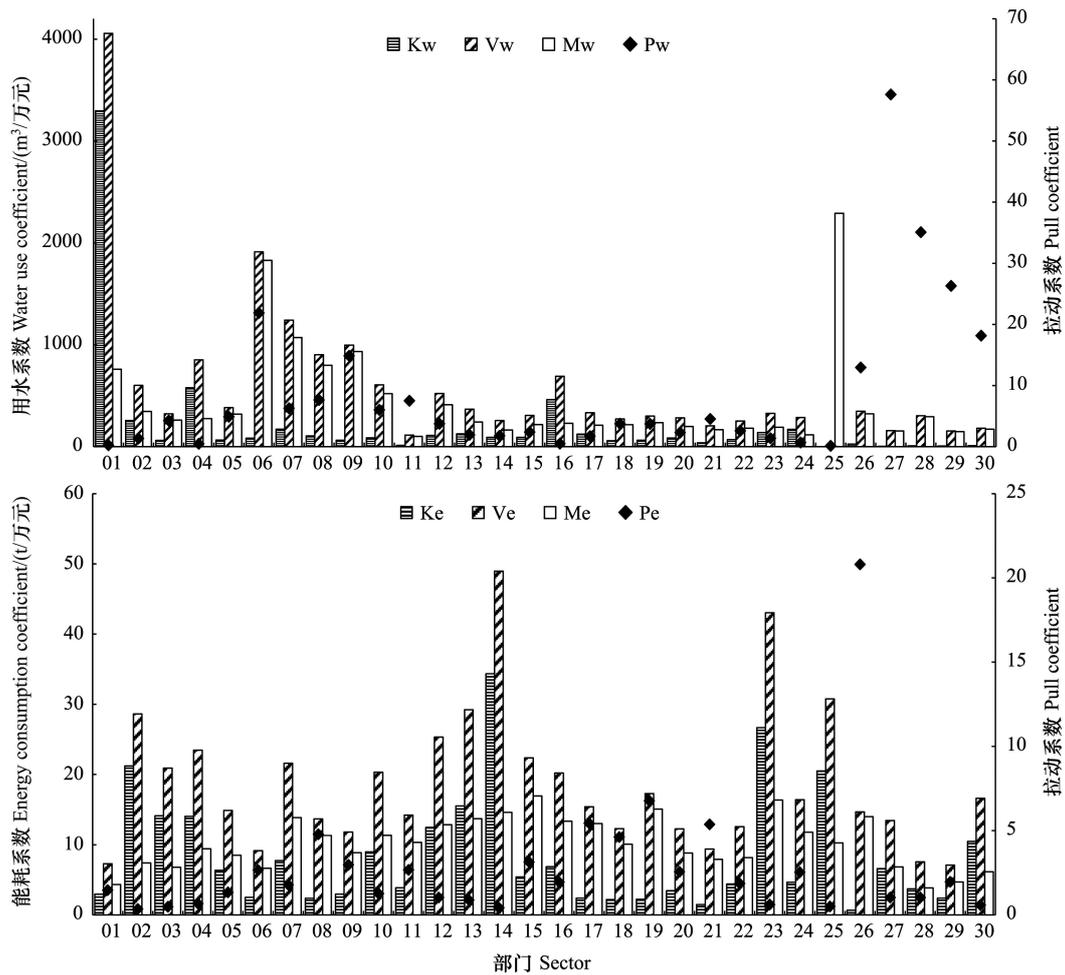


图 4 沿海地区各部门用水系数和能耗系数及其拉动系数

Fig.4 Water use coefficients,energy consumption coefficients and pull coefficients of various sectors in coastal areas

2.4 水-能系统关联

2.4.1 相对用水、能耗系数

本文通过完全用水、能耗系数反映该部门相对于沿海所有部门平均水平下的资源利用效率,相对用水系数超沿海地区平均水平 1 倍的部门表示为高耗水部门,能源上进行同样界定(表 2)。结果显示沿海各省农业

(01)均为 HwLe 部门,河北、辽宁和海南的多数部门为 LwHe 部门,如海南的金属冶炼和压延加工业(14)的相对用水系数小于 1,能耗系数达沿海地区平均水平的 12 倍,具有典型的低用水和高能耗特点,海南在产品和服务生产过程中应以节能为重点,提高能源利用效率。各省的仪器仪表(21)、交通运输设备(18)以及批发零售住宿餐饮业(28)表现出 LwLe 的特点,相对用水和能耗系数均小于 1。沿海各省的水生产供应业(25)均呈现 HwHe 的特点,辽宁和江苏的纺织业(07)、浙江的金属矿采选业(02)以及广西的化学业(12)同样为 HwHe 部门,这些部门应同时注重节水和节能,降低资源成本。

表 2 沿海地区各部门相对用水、能耗系数

Table 2 Relative water use, energy consumption coefficients of various sectors in coastal areas

部门 Sector	天津		河北		辽宁		上海		江苏		浙江		福建		山东		广东		广西		海南	
	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E
01	●	○	●	○	●	○	●	○	●	○	●	○	●	○	●	○	●	○	●	○	●	○
02	●	○	○	●	○	●	●	○	○	●	○	●	○	○	○	●	○	○	○	●	○	○
03	○	○	○	●	○	●	○	○	○	○	○	○	●	○	○	●	○	○	○	○	○	○
04	○	○	○	●	○	●	●	○	○	●	●	●	○	○	○	○	○	●	○	○	○	●
05	○	○	○	●	○	○	●	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
06	●	○	●	○	●	○	○	○	○	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
07	○	○	○	●	●	●	○	●	●	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
08	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
09	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
10	○	○	○	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
11	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
12	○	○	○	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
13	○	●	○	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
14	○	●	○	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
15	○	●	○	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
16	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
17	○	○	○	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
18	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
19	○	○	○	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
20	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
21	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
22	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
23	○	●	○	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
24	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
25	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●	●	●	●
26	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
27	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
28	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
29	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
30	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

W: 水 Water; E: 能 Energy; ●表示相对用水(或能耗)系数大于 1, ○表示相对用水(或能耗)系数小于等于 1; ●●代表高用水-高能耗部门, ●○代表高用水-低能耗部门, ○●代表低用水-高能耗部门, ○○代表低用水-低能耗部门

2.4.2 相对用水、能耗乘数

本文通过间接用水、能耗乘数反映该部门相对于沿海所有部门平均水平下的拉动效应,相对用水乘数大于 1 则表示为强水连接部门,能源上进行同样界定(表 3)。结果显示机械设备部门如金属制品(15)、通用设备(16)、专用设备(17)以及电气机械和器材(19)表现出 WwSe 的特点。第三产业多为 SwWe 部门,如江苏的

其他部门(29),相对用水和能耗乘数分别为 10 倍、1 倍,以及生活消费(30)的相对用水乘数是沿海地区平均水平的 11 倍,相对能耗乘数却小于 1。各省的农业(01)、煤炭采选(02)以及金属矿采部门(04)都属于 WwWe 部门。这些部门的用水或能耗主要直接发生在其内部生产过程,应重点提高部门自身的资源利用效率。相对用水或能耗乘数远高于沿海地区平均水平的部门,如海南的交通运输仓储邮政业(27),相对用水乘数是沿海地区平均水平的 14 倍,广西的通信设备部门(20)、海南的仪器仪表(21)的相对能耗乘数分别为 14 倍、13 倍,是水-能系统的重要节点,这些部门的用水或能耗联系尤其紧密。沿海地区的建筑业(26)表现出强能连接的特点,天津、河北、辽宁、浙江、福建和海南的建筑业还具有强水连接的特点。

表 3 沿海地区各部门相对用水、能耗乘数

Table 3 Relative water use, energy consumption multipliers of various sectors in coastal areas

部门 Sector	天津		河北		辽宁		上海		江苏		浙江		福建		山东		广东		广西		海南	
	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E
01	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
02	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
03	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■
04	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
05	□	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	□	□
06	■	■	■	■	■	□	□	□	□	□	■	□	□	□	■	□	■	□	□	□	■	□
07	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	□	□	□	□	□	□	■	□
08	■	■	■	■	■	■	□	□	□	■	■	■	□	■	■	■	□	■	□	■	■	□
09	■	□	■	■	□	□	□	□	□	□	■	■	■	□	□	■	■	□	□	□	■	□
10	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	□
11	■	□	□	■	□	□	□	□	■	■	□	■	□	□	□	□	□	□	□	■	□	□
12	■	□	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	□	□	□	□	□	□	□
13	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	□
14	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
15	■	□	□	■	□	□	□	□	□	■	□	□	□	■	□	■	□	■	□	■	□	□
16	■	■	□	■	□	■	□	□	□	□	□	□	□	■	□	■	□	■	□	□	□	□
17	□	■	□	■	□	□	□	□	□	■	□	■	□	■	■	■	□	□	□	■	□	■
18	■	□	■	■	□	■	□	□	□	■	■	□	□	■	■	■	□	■	□	■	□	□
19	■	■	□	■	□	■	□	□	□	■	■	■	□	□	■	■	□	■	□	■	□	■
20	■	■	□	■	□	□	□	□	□	□	■	□	□	□	■	□	□	□	□	■	□	□
21	■	■	□	■	□	■	□	□	□	■	□	□	□	□	□	■	□	□	□	■	□	■
22	■	□	□	■	□	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■
23	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	□
24	■	■	□	■	□	□	■	■	□	■	■	■	□	□	■	□	■	■	□	■	□	□
25	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
26	■	■	■	■	■	■	□	■	□	■	■	■	■	■	□	■	□	■	□	■	■	■
27	■	□	■	□	■	□	■	□	□	□	■	□	■	□	■	□	□	□	■	□	■	□
28	■	□	■	□	■	□	□	□	□	□	■	□	■	□	■	□	■	□	■	□	■	□
29	■	□	■	□	□	□	□	□	■	□	■	□	□	□	■	□	■	□	■	□	■	□
30	□	□	■	□	□	□	□	□	■	□	■	□	■	□	■	□	■	□	■	□	□	□

■表示相对用水(或能耗)乘数大于 1, □表示相对用水(或能耗)乘数小于等于 1; ■■代表强水-强能连接部门, ■□代表强水-弱能连接部门, □■代表弱水-强能连接部门, □□代表弱水-弱能连接部门

2.5 水-能系统耦合协调度

由于中国沿海各省地缘特征和经济水平不同,其部门水资源和能源在流动过程中有不同表现。分析省市-部门尺度上水-能系统的耦合度和协调发展水平有利于识别水和能源的消耗及需求差异,通过协调资源流动

更好地实现资源管理,降低资源短缺和冲突的风险。本文采用耦合协调模型分析中国沿海地区各部门水-能系统的耦合协调程度,沿海 11 省市共 330 个部门的能源系统综合评价指数(0.702)整体略高于水资源系统综合评价指数(0.685),能源系统的综合发展水平优于水系统,应以提高水资源开发利用的高效性和可持续性为侧重点。各部门的水-能系统耦合度基本稳定在 0.998 左右,整体处于高水平耦合状态,说明水资源系统和能源系统相互影响且依赖程度较高。水-能耦合协调度具有一定差异,根据已有研究^[35]和本文的计算结果进行分类,结果显示沿海地区各部门的水-能系统都处于协调发展状态(表 4),基于此本文结合各部门的水-能消耗情况和联系强度将耦合协调类型进行了具体划分(表 5)。

表 4 沿海地区各部门的水-能耦合协调度

Table 4 Degree of water-energy coupling coordination of various sectors in coastal areas

部门 Sector	天津	河北	辽宁	上海	江苏	浙江	福建	山东	广东	广西	海南
01	0.798	0.658	0.773	0.810	0.686	0.829	0.843	0.783	0.911	0.752	0.772
02	0.843	0.826	0.837	0.843	0.831	0.810	0.842	0.834	0.803	0.837	0.843
03	0.839	0.827	0.822	0.843	0.839	0.843	0.843	0.832	0.839	0.843	0.843
04	0.840	0.837	0.832	0.843	0.836	0.833	0.842	0.841	0.841	0.839	0.832
05	0.841	0.840	0.841	0.843	0.839	0.841	0.843	0.842	0.842	0.843	0.835
06	0.831	0.827	0.851	0.837	0.829	0.877	0.848	0.837	0.829	0.812	0.840
07	0.841	0.836	0.842	0.839	0.822	0.838	0.835	0.833	0.838	0.840	0.839
08	0.844	0.839	0.856	0.843	0.830	0.853	0.827	0.843	0.825	0.848	0.841
09	0.844	0.844	0.842	0.841	0.834	0.849	0.842	0.841	0.842	0.838	0.841
10	0.838	0.841	0.841	0.840	0.835	0.841	0.836	0.837	0.832	0.839	0.813
11	0.836	0.841	0.834	0.841	0.843	0.841	0.839	0.838	0.841	0.843	0.837
12	0.824	0.832	0.838	0.801	0.803	0.831	0.828	0.830	0.829	0.834	0.689
13	0.833	0.834	0.831	0.832	0.831	0.831	0.813	0.831	0.829	0.825	0.825
14	0.809	0.808	0.812	0.795	0.818	0.838	0.820	0.826	0.830	0.799	0.760
15	0.834	0.838	0.840	0.831	0.834	0.845	0.841	0.841	0.834	0.843	0.837
16	0.842	0.841	0.842	0.831	0.828	0.840	0.841	0.839	0.842	0.846	0.829
17	0.842	0.840	0.845	0.837	0.824	0.855	0.842	0.838	0.841	0.844	0.843
18	0.836	0.843	0.840	0.831	0.833	0.839	0.846	0.847	0.837	0.847	0.841
19	0.847	0.842	0.845	0.839	0.804	0.849	0.842	0.844	0.837	0.846	0.843
20	0.840	0.845	0.844	0.833	0.807	0.857	0.839	0.843	0.819	0.844	0.838
21	0.843	0.844	0.843	0.842	0.834	0.847	0.843	0.843	0.842	0.843	0.843
22	0.842	0.843	0.842	0.834	0.842	0.842	0.838	0.840	0.841	0.843	0.844
23	0.828	0.826	0.820	0.833	0.810	0.809	0.818	0.829	0.808	0.827	0.763
24	0.843	0.843	0.835	0.842	0.843	0.843	0.843	0.841	0.841	0.843	0.840
25	0.826	0.836	0.823	0.717	0.835	0.833	0.827	0.836	0.837	0.830	0.835
26	0.836	0.879	0.753	0.795	0.848	0.835	0.841	0.846	0.989	0.757	0.837
27	0.832	0.836	0.832	0.815	0.837	0.837	0.835	0.838	0.833	0.834	0.826
28	0.828	0.833	0.839	0.817	0.840	0.830	0.838	0.842	0.837	0.840	0.826
29	0.829	0.829	0.855	0.796	0.841	0.834	0.827	0.844	0.806	0.834	0.823
30	0.820	0.811	0.829	0.808	0.822	0.819	0.817	0.831	0.808	0.815	0.813

研究发现,广东建筑业的水-能系统耦合协调度最高,达 0.989,为优质协调 LwLe-WwSe 型,发展基础较好,其水、能之间的相互作用关系得到了有效地管理和控制。该部门表现出水-能消耗低和强能连接的特点,能源的使用易对水-能系统协调产生影响。河北的建筑业(0.879)以及浙江的食品烟草部门(0.877)等都具有较高的协调发展水平,分别为良好协调 LwHe-SwSe 型和良好协调 HwLe-SwWe 型,这可能由于其单位产出用水和能耗较低、水和能源开发程度高以及外购水资源和能源密集型产品等原因使得资源经济可持续发展水平

较高,水系统和能系统发展基础和协调能力较好。河北的农业部门耦合协调度为 0.658,耦合协调水平最低,为初级协调 HwLe-WwWe 型,与之相同的还有江苏的农业(0.686),海南的化学部门(0.689)表现为初级协调 LwHe-WwWe 型,这些部门水和能源使用的联系强度均较差,这主要是因为农产品生长周期较长,需要大量水资源,传统工业单位产出用水和能耗高,在沿海地区贸易中出口的产品多为低附加值的水资源和能源密集型产品,虚拟水或隐含能的净流出对水-能系统的耦合协调度提升产生了一定的抑制作用,使其处于较低水平,这类部门的水-能系统还存在着较大的耦合协调空间。

表 5 沿海地区各部门水-能耦合协调度的分类体系及其判别标准

Table 5 Classification system and criterion of water-energy coupling coordination degree of various sectors in coastal areas

协调发展类 Coordinated development class	耦合协调度 Coupling coordination degree	基本类型 Basic type	
		结合资源利用效率 Combined with resource efficiency	结合拉动效应 Combined with the pulling effect
优质协调发展类 High quality coordinated development class	0.900—1.000	优质协调 HwHe 型	优质协调 SwSe 型
		优质协调 HwLe 型	优质协调 SwWe 型
		优质协调 LwHe 型	优质协调 WwSe 型
良好协调发展类 Good coordinated development class	0.800—0.899	优质协调 LwLe 型	优质协调 WwWe 型
		良好协调 HwHe 型	良好协调 SwSe 型
		良好协调 HwLe 型	良好协调 SwWe 型
良好协调 LwLe 型	良好协调 WwSe 型	良好协调 WwWe 型	良好协调 WwWe 型
		良好协调 WwWe 型	良好协调 WwWe 型
		良好协调 WwWe 型	良好协调 WwWe 型
中级协调发展类 Intermediate level coordinated development class	0.700—0.799	中级协调 HwHe 型	中级协调 SwSe 型
		中级协调 HwLe 型	中级协调 SwWe 型
		中级协调 LwHe 型	中级协调 WwSe 型
初级协调发展类 Primary coordinated development class	0.600—0.699	中级协调 LwLe 型	中级协调 WwWe 型
		初级协调 HwHe 型	初级协调 SwSe 型
		初级协调 HwLe 型	初级协调 SwWe 型
初级协调 LwHe 型	初级协调 WwSe 型	初级协调 WwWe 型	

3 讨论

3.1 水-能系统关联研究方法的适用性

为了实现保障水-能系统安全的最终目标,把握生产和贸易过程中虚拟水和隐含能的高消耗和强连接部门非常关键。本文通过用水与能耗的相对系数和相对乘数揭示了沿海地区各部门相对于沿海地区整体水平的水-能消耗强度和拉动强度,在水-能系统内部资源供需特征的表达方面更加细致,主要体现在这种水-能系统关联研究方法通过测量水和能源总消耗系数确定部门缓解资源压力的重点是节水还是节能,调整政策侧重点提高资源利用效率;另外,通过比较沿海地区各部门的用水和能耗间接乘数分析水与能源的省市-部门间产业联系程度,识别重要的水-能连接节点,确定节水和节能的关键部门。

本文分析省市-部门尺度的资源利用效率发现沿海地区的农业(01)均为 HwLe 部门,这主要由农作物的生长周期长,以及它们对水资源的高需求所决定的,河北、辽宁和海南的 LwHe 部门居多,如海南金属冶炼和压延加工业(14)具有典型的低用水和高能耗特点,这主要是因为海南在用水限制下采取了封闭循环水系统和优化生产工艺和改进设备等措施,能源供应以石油、天然气和煤炭为主,相对而言缺乏可再生能源和清洁能源的供应,导致了较高的能源消耗。HwLe 和 LwHe 部门在生产过程中应分别将节水和节能作为重点,以协同管理水和能源。水生产供应业(25)均呈现 HwHe 的特点,这主要是由于生产过程本身对水资源的高度依赖以及运输、相关设备运行和工艺处理等方面的能源消耗导致,也反映了涉水部门与能源的密切相关。浙江的金属矿采选业(02)以及广西的化学业(12)同样为 HwHe 部门,行业的原材料特性和生产过程决定了其高

用水高能耗的特点,如化学原料需要在高温或高压条件下进行反应。这些部门在产品和服务生产过程中应同时注重节水和节能,降低资源成本。

分析省市-部门间拉动效应发现建筑业(SwSe)与其他部门具有强烈的水-能联系,应对其重点监控,这与学者李虹等^[36]、Wu和Zhang等^[37]的研究结果相契合。主要有以下原因,其一,建筑业处于产业链的末端,需要其他部门的原材料投资,其较高的间接用水和能源乘数对整个经济系统有很强的影响。其二,建筑行业存在的大拆大建和短命建筑现象造成了对水和能源的极大浪费。其三,建筑业所需的水泥、钢铁和沥青等原材料的生产需要消耗大量的水和能源,而上游部门原材料利用和中间材料转化的效率较低。应提高投入材料的利用与转化效率以减轻建筑对环境的影响^[38-39]。本文的水-能系统关联分析为沿海地区水-能协同管理提供了新的视角,对其他处于快速发展阶段、面临资源短缺挑战的地区具有一定的参考价值。此外,该方法还可以进一步扩展到具有多种资源的复杂关系类型^[40-41]。

3.2 从虚拟水和隐含能流动的角度研究水-能系统耦合

沿海地区对水和能源的高需求导致当地的水资源和能源供给严重不足,必须依赖外部的资源流入,表现为虚拟水和隐含能流动。这些流动量是体现这种供需关系的重要指标,可识别出多区域多部门流动过程中的关键节点,明确技术创新的方向和重点是节水还是节能,有助于制定更科学更具针对性的水-能协同政策。已有研究也考虑了这个问题,如学者Liu等^[42]认为资源的区域转移与贸易流量密切相关,系统耦合协同管理应考虑区域间的贸易联系,减少系统虚拟资源的净流出量,有利于促进系统的耦合协调度提升。因此,从虚拟水和隐含能流动的角度研究中国沿海地区的水-能系统耦合具有合理性。结合本文的研究问题,在虚拟资源流动视角下,如何提高水资源和能源的利用效率和实现沿海地区水-能系统协同管理是一个亟需回答的科学问题。

本文聚焦沿海地区的水-能系统,分析了省市-部门尺度上的水-能系统关联及其耦合协调度,旨在发挥跨部门的耦合协同效应以提高资源利用效率和系统稳定性。本文结合投入产出分析和耦合协调度模型测度了沿海地区各部门水-能系统的耦合协调程度。研究发现,各部门的水-能系统均处于高水平耦合阶段,且都处于协调发展状态,但结合水-能利用效率和拉动效应划分,各部门耦合协调发展水平存在一定差异,需采取针对性措施以协调水和能源利用关系、部门间拉动效应及虚拟水和隐含能的流动,进一步提升沿海地区水-能系统的耦合协调程度^[34]。对于强连接低消耗的优质协调类部门如广东建筑业,及良好协调类如河北建筑业和浙江食品烟草业,政府应提供政策和资金支持重点发挥这些部门的龙头带动作用,鼓励这些部门在绿色发展、节能减排和资源利用效率提升等方面进行技术创新和示范应用,并与相关产业之间搭建产供需有效对接的合作平台以加速集群发展。对于弱连接高消耗的初级协调类部门,如河北农业、江苏农业、海南化学部门以及上海的水生产供应部门,水-能系统的耦合协调程度均较低,这类部门的水-能系统存在着较大的耦合协调空间,未来应重点关注系统性水能开发,平衡水资源和能源的利用与需求,提高耦合协调度。如通过技术革新,在不增加水和能源投入的情况下提高生产力,实现产值的增长;对于间接消耗大的产业,着重提升产业各部门的中间产品利用率,减少间接资源消耗;调整贸易模式,减少高用水和高能耗产品出口的同时进口高用水和高耗能产品,通过贸易战略保证沿海地区水和能源安全。

3.3 水-能协同管理建议

(1)沿海地区作为“蓝色粮仓”,具有巨大的生产潜力,需突破关键技术提升水和能源生产能力。针对农业等高耗水产业,可考虑通过种植优质节水的经济作物等方法减少农业耗水;针对金属冶炼和压延加工品业等能源密集型重工业,可通过改进生产工艺和推行资源循环利用等途径降低资源需求;针对HwHe部门,在产品和服务生产过程中必须根据区域经济发展状况以及虚拟水和隐含能流动状况,大力加大技术投入,加快推广先进的节水技术和设备,降低资源成本,并从用水或用能效率较高的地区调入水或能源密集型产品,实现水-能协同节约。

(2)对于水-能强连接的部门,如建筑业,建议其上游部门原材料在保证一定的经济效益时优先选择持久高效、可再生的原材料,以减少资源浪费和中间产品制造的环境足迹;另外将重点放在中间环节,增加中间产

品的回收率,如对涉水设备制定水效、能效双准入门槛^[43],采用热能回收系统将废热转化为能源,促进资源循环利用,创造更加可持续的生产模式。

(3) 建筑业和制造业等水-能系统处于高耦合协调水平的部门应协助耦合协调水平仅处于初级协调发展阶段的传统工农业部门协同发展,如建立部门间技术支持与合作平台、实施资源补偿机制等手段减少相关产品和服务生产过程中的水和能源消耗,协调水-能共享。受支持的部门应根据自身实际情况运用财政补贴等政策工具,鼓励和扶持部门高新技术产业形成。

(4) 沿海地区应充分合理利用海洋这一巨大水源。调水工程、海水淡化、海水冷却以及污水处理回用等非常规水工程多是以能耗为驱动的水量转移和水质净化过程。就海水淡化而言,本质上是“以能换水”的能源密集型产业,具有密切的水-能联系,各部门可针对传统及新能源两类海水淡化厂建立不同的水-能管理模型和协同运行机制,使淡化过程高效且资源成本最低。另外,海水冷却系统应加快可再生能源发电技术以及高效冷却水技术的发展与推广,实现水效、能效的整体提升,改善沿海地区的水和能源安全并促进碳减排。

4 结论

(1) 分析虚拟水和隐含能流动发现,广西、江苏是沿海地区最大的虚拟水净流出省,广东、浙江是最大的虚拟水净流入省。虚拟水净流入的5个省(天津、浙江、福建、山东和广东)同样是隐含能的净流入省,此外,海南也是隐含能的净流入省,辽宁是隐含能的主要流出省。部门上看,农业(01)、建筑业(26)是虚拟水流动关键部门,建筑业(26)是隐含能流动关键部门。主要能源部门中炼焦(石油加工和炼焦)是与用水密切相关的领域,针对各省在水部门耗能方面存在的差异应采取不同的措施。

(2) 上海和福建用水系数排名在前,能耗系数表现为海南最高,上海最低。山东的用水拉动系数最高达1.60,能耗拉动系数天津最高达1.97,海南最低,仅为天津的35%。部门上看,农业直接用水最高,用水拉动系数接近于0,第三产业和多数工业部门的间接用水占完全用水的80%以上。高能耗部门的完全能耗系数分布在28—40t/万元之间,能耗拉动系数上建筑业最高达20.81。

(3) 沿海各省农业(01)均为HwLe部门;河北、辽宁和海南的多数部门为LwHe部门,如海南的金属冶炼和压延加工业(14),HwLe和LwHe部门应分别将节水和节能作为重点,以协同管理水和能源。水生产供应业(25)等HwHe部门在生产过程中应同时注重节水和节能。

(4) 海南的交通运输仓储邮政业(27)相对用水乘数远高于沿海地区平均水平,用水联系密切。广西的通信设备部门(20)以及海南的仪器仪表部门(21)相对能耗乘数远高于沿海地区平均水平,能耗联系密切。建筑业的相对用水和能耗乘数均高于沿海地区平均水平,作为中间部门与其他部门具有强烈的水-能联系,是节水节能的最关键部门。

(5) 沿海地区各部门能系统的综合发展水平优于水系统,水-能系统处于高水平耦合阶段,耦合协调水平都处于协调发展状态,传统工农业部门的耦合协调水平仅达初级协调,未来需协调这些部门的水和能源利用、部门间拉动效应及虚拟水和隐含能的流动,进一步提升其耦合协调水平。

参考文献(References):

- [1] 赵荣钦,李志萍,韩宇平,Kandlikar M,张战平,丁明磊. 区域“水-土-能-碳”耦合作用机制分析. 地理学报,2016,71(9): 1613-1628.
- [2] 洪思扬,王红瑞,来文立,朱中凡. 我国能源耗水空间特征及其协调发展脱钩分析. 自然资源学报,2017,32(5): 800-813.
- [3] Hamiche A M, Stambouli A B, Flazi S. A review of the water-energy nexus. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 65: 319-331.
- [4] 高向龙,石辉,党小虎. 基于投入产出模型的黄河“几字弯”城市群用水特征与节水关键区域. 生态学报,2022,42(24): 10150-10163.
- [5] 徐政,郑霖豪,程梦瑶. 新质生产力赋能高质量发展的内在逻辑与实践构想. 当代经济研究,2023(11): 51-58.
- [6] 王菲,曹永强,范帅邦. “双碳”目标下东北三省水-能源纽带关系及网络特征分析. 生态学报,2022,42(14): 5692-5707.
- [7] 郝帅,孙才志. 水-能纽带关系下中国省际煤炭水足迹空间转移特征分析. 华北水利水电大学学报:自然科学版,2023,44(6): 16-25.
- [8] 李雨岑,张鹏鹏,张力小,郝岩,李心晴. 中国水-能-粮资源适配格局动态演化及其驱动因素. 生态学报,2023,43(21): 8985-8997.
- [9] 刘秀丽,郭丕斌,王昕. 煤炭资源型地区产业能-水足迹效率及影响因素. 生态学报,2020,40(24): 8999-9010.

- [10] Li X, Yang L L, Zheng H R, Shan Y L, Zhang Z Y, Song M L, Cai B F, Guan D B. City-level water-energy nexus in Beijing-Tianjin-Hebei region. *Applied Energy*, 2019, 235: 827-834.
- [11] 洪思扬, 王红瑞, 程涛, 梁俊芬, 方伟. 国际及省际贸易视角下的中国虚拟水和隐含能源流通规律分析. *地理科学*, 2022, 42(10): 1735-1746.
- [12] 孙才志, 靳春玉, 阎晓东. 基于 MRIO 和 ENA 的中国省区能源-水资源耦合关系研究. *华北水利水电大学学报: 自然科学版*, 2020, 41(3): 32-40.
- [13] Wang S G, Chen B. Energy-water nexus of urban agglomeration based on multiregional input-output tables and ecological network analysis: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei Region. *Applied Energy*, 2016, 178: 773-783.
- [14] 吴菲, 房蕾, 冯波. 区域水-能耦合关系及资源短缺风险评估. *环境经济研究*, 2022, 7(1): 78-97.
- [15] 彭焜, 朱鹤, 王赛鸽, 陈斌, 魏文栋, 李佳硕. 基于系统投入产出和生态网络分析的能源-水耦合关系与协同管理研究——以湖北省为例. *自然资源学报*, 2018, 33(9): 1514-1528.
- [16] 王志强, 姜文桓, 卢诗月. 基于生态网络分析的新疆“水-能-碳”耦合系统特征研究. *干旱区地理*, 2023, 46(12): 2005-2016.
- [17] 姜珊, 朱永楠, 赵勇, 王庆明, 何国华, 王丽珍, 常免宇. 基于生态网络分析法的城市水与能源网络结构解析. *水电能源科学*, 2022, 40(9): 66-70.
- [18] 王菲, 陈敏, 曹永强, 杨亚锋. 黄河流域九省区水-土-能-碳关联系统网络特征. *水利水电科技进展*, 2024, 44(4): 31-37.
- [19] 尤增涛, 陈浩, 肖连刚, 赵荣钦. 碳水双重约束下产业结构优化与情景模拟. *华北水利水电大学学报: 社会科学版*, 2024, 40(3): 37-47.
- [20] 毛熙彦, 漆信贤, 刘艺, 宋娅娅. 全球化变革下的中国对外自然资源流动及其关键研究问题. *自然资源学报*, 2021, 36(12): 3054-3068.
- [21] 邓光耀, 秦小钰. 中国隐含能源和虚拟水贸易核算及联系强度研究. *河北地质大学学报*, 2023, 46(2): 87-97.
- [22] Cheng L, Tian J P, Xu H G, Chen L J. Unveiling the nexus profile of embodied water-energy-carbon-value flows of the Yellow River Basin in China. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(23): 8568-8577.
- [23] 王保乾, 肖佳慧. 长江经济带省际贸易隐含水-能-碳耦合关系研究. *水利经济*, 2023, 41(1): 47-54, 61, 104-105.
- [24] Wang X C, Klemeš J J, Wang Y T, Dong X B, Wei H J, Xu Z H, Varbanov P S. Water-energy-carbon emissions nexus analysis of China: an environmental input-output model-based approach. *Applied Energy*, 2020, 261: 114431.
- [25] 彭辉, 徐佩琦, 邵玲, 潘云龙, 何国嘉, 郭曼丽, 伍梓. 京津冀地区水-能系统关联及协同效益. *资源科学*, 2022, 44(11): 2330-2340.
- [26] 郑靖伟, 孙才志. 不同尺度下水-能-碳系统空间关联关系分析. *华北水利水电大学学报: 自然科学版*, 2024, 45(2): 36-47.
- [27] 于晓华, 刘畅, 张国政. 国际粮食贸易背景下的市场整合与虚拟资源流动——以中国巴基斯坦大米市场为例. *自然资源学报*, 2021, 36(6): 1505-1520.
- [28] Allan, J.A. Virtual water: a strategic resource. *Ground Water*, 1998, 36(4): 545-546.
- [29] Costanza R. Embodied energy and economic valuation. *Science*, 1980, 210(4475): 1219-1224.
- [30] Liu Z W, Huang Q X, He C Y, Wang C B, Wang Y H, Li K X. Water-energy nexus within urban agglomeration: an assessment framework combining the multiregional input-output model, virtual water, and embodied energy. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 164: 105113.
- [31] 王雪妮. 基于区域间投入产出模型的中国虚拟水贸易格局及趋势研究. *管理评论*, 2014, 26(7): 46-54.
- [32] Isard W. Interregional and regional input-output analysis: a model of a space-economy. *The Review of Economics and Statistics*, 1951, 33(4): 318.
- [33] 王兆华, 邹朋宇, 李浩, 张斌, 高浚淇. 经济-能源-水耦合视角下黄河流域区域协同发展路径. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(8): 10-19.
- [34] 王凤初, 曹建军, 王宁, 焦雨萌, 李裕. 近 20 年我国虚拟水、能消耗及耦合和需求预测. *中国环境科学*, 2022, 42(10): 4919-4930.
- [35] 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系——以珠江三角洲城市群为例. *热带地理*, 1999, 19(2): 171-177.
- [36] 李虹, 王帅. 中国行业隐含能源消费及其强度的变动与影响因素. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(5): 47-57.
- [37] Wu X, Zhang Z H. Input-output analysis of the Chinese construction sector. *Construction Management and Economics*, 2005, 23(9): 905-912.
- [38] Li G L, Zhang J P. Reason and disadvantage of the short-lived residential house in China. *Advanced Materials Research*, 2012, 512: 2775-2779.
- [39] Cui D Q. Extend building life and promote building energy efficiency. *Advanced Materials Research*, 2014, 1073: 1239-1243.
- [40] Zhao R Q, Liu Y, Tian M M, Ding M L, Cao L H, Zhang Z P, Chuai X W, Xiao L G, Yao L G. Impacts of water and land resources exploitation on agricultural carbon emissions: the water-land-energy-carbon nexus. *Land Use Policy*, 2018, 72: 480-492.
- [41] Chen Y M, Li X, Liu X P, Zhang Y, Huang M. Tele-connecting China's future urban growth to impacts on ecosystem services under the shared socioeconomic pathways. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 765-779.
- [42] Liu X L, Vu D, Perera S C, Wang G F, Xiong R. Nexus between water-energy-carbon footprint network: multiregional input-output and coupling coordination degree analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 430: 139639.
- [43] 王建华, 朱永楠, 李玲慧, 李嘉欣, 姜珊, 何国华. 社会水循环系统水-能-碳纽带关系及低碳调控策略研究. *中国工程科学*, 2023, 25(4): 191-201.