

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.05.016

京津冀地区水-能源利用效率与资源压力核算

洪思扬¹, 王红瑞², 梁俊芬¹, 方 伟¹

(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. 北京师范大学水科学研究院城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875)

摘要:基于多层次投入产出法,核算了京津冀地区各部门的三层次体现水强度及体现能源强度,分析了京津冀地区水与能源的“源”与“汇”流通特征,构建了水-能源贸易间接消耗资源压力指数,对贸易引发的资源压力进行了定量化分析。结果表明,京津冀三地全行业平均体现水强度分别为 $69.90 \text{ m}^3/\text{万元}$ 、 $68.51 \text{ m}^3/\text{万元}$ 和 $103.13 \text{ m}^3/\text{万元}$,体现能源强度分别为 $28.58 \text{ GJ}/\text{万元}$ 、 $22.84 \text{ GJ}/\text{万元}$ 和 $38.29 \text{ GJ}/\text{万元}$,资源利用效率天津最高、河北最低;北京和天津受限于资源禀赋条件,倾向于调入原产品和最终消费品,其经济和资源之间的脱钩发展得益于将资源密集型产品的生产转移至其他省份,河北则为京津地区资源安全使用提供了保障;体现水贸易对北京和天津各部门水资源压力的缓解作用显著强于河北,体现能源贸易对北京各部门能源压力的缓解作用显著强于天津和河北;体现水贸易对京津冀地区能源压力的影响显著低于体现能源贸易对水资源压力的影响,能源耗水在水-能源纽带关系中起到主导作用。

关键词:水与能源;资源强度;资源压力;多层次投入产出法;京津冀地区

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)05-0102-10

Calculation of energy-water utilization efficiency and resource pressure in Beijing-Tianjin-Hebei region // HONG Siyang¹, WANG Hongrui², LIANG Junfen¹, FANG Wei¹ (1. *Institute of Agricultural Economics and Information, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China*; 2. *Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

Abstract: Based on the multi-scale input-output method, the three-scale embodied water intensity and embodied energy intensity of each sector in the Beijing-Tianjin-Hebei region were calculated, source-to-sink flow characteristics of embodied water and energy were analyzed, and the water-energy indirect consumption pressure indexes were constructed to quantitatively analyze the resource pressure caused by trade. The results show that the average embodied water intensities of the whole sectors in Beijing, Tianjin, and Hebei were $69.90 \text{ m}^3/10\,000 \text{ yuan}$, $68.51 \text{ m}^3/10\,000 \text{ yuan}$, and $103.13 \text{ m}^3/10\,000 \text{ yuan}$, respectively. The average embodied energy intensities of the whole sectors in Beijing, Tianjin, and Hebei were $28.58 \text{ GJ}/10\,000 \text{ yuan}$, $22.84 \text{ GJ}/10\,000 \text{ yuan}$, and $38.29 \text{ GJ}/10\,000 \text{ yuan}$, respectively. Resource utilization efficiency was highest in Tianjin and lowest in Hebei. Limited by resource endowment conditions, Beijing and Tianjin tended to absorb raw products and final consumer products, and the decoupling development of their economy and resource benefited from the transfer of production of resource-intensive products to other provinces. Hebei provided a guarantee for the resource security in Beijing and Tianjin. The alleviating effect of embodied water trade on water pressure of each sector in Beijing and Tianjin was significantly stronger than that in Hebei, and the alleviating effect of embodied energy trade on energy pressure of each sector in Beijing was significantly stronger than that in Tianjin and Hebei. In the Beijing-Tianjin-Hebei region, the impact of embodied water trade on energy pressure was significantly lower than the impact of embodied energy trade on water pressure, and the water consumption of energy plays a leading role in the energy-water nexus.

Key words: water and energy; resource intensity; resource pressure; multi-scale input-output method; Beijing-Tianjin-Hebei region

基金项目:国家自然科学基金(51879010);广东省自然科学基金(2020A151501912);广东省农业科学院 2021 年度科技人才引进专项资金项目(R2021YJ-YB3009);广东省农业科学院青年导师制项目(R2020QD-053)

作者简介:洪思扬(1990—),女,助理研究员,博士,主要从事水资源系统分析研究。E-mail: hongsy@mail.bnu.edu.cn

通信作者:方伟(1979—),男,副研究员,博士,主要从事农业经济研究。E-mail: fangwei9103@163.com

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,前者作为基础性自然资源,为人类的生存起着基础性保障作用,后者作为重要的战略资源,对保障国家安全及地区经济发展至关重要,两者之间的关系十分密切。如今,水资源短缺现象日渐频发,水污染危机日趋严重^[1-2],同时,能源的无节制消耗也给生态环境带来了一系列负面影响^[3-4]。联合国于2014年举办的世界水发展报告的主题是“水与能源”,水与能源之间的相互关系已成为国际社会关注的热点问题^[5-7],研究两者之间的关系具有重要的现实意义。

京津冀地区是我国3个世界级城市群之一,该地区以不足全国总面积3%的地域面积承载着全国8%的人口,创造了10%的经济总量。但是,与区域经济快速发展相伴而生的,是人口的不断集聚、资源的加速消耗和环境的持续恶化,地区人地关系愈发紧张,资源环境超载压力不断上升。在水资源方面,以北京、天津为核心的京津冀地区必须保有较高的供水保障率^[8-9],这关系到华北地区甚至整个中国的可持续发展、社会的安定和人民的生活需求^[10],一旦出现水资源短缺危机,将不可避免地造成重大的经济损失和国际政治影响。在能源方面,快速的经济发展带来的能源过度消费、能源过度开采和环境污染问题愈发严重,京津冀三地能源消费总量及能源利用效率差异较大,且整体效率较低,三地产业间对接难度较大,难以形成配套完整的产业链条,产业间重叠现象严峻,竞争合作关系较为含糊,这些均造成了能源的过度消费和效率低下,煤、石油等一次能源的过度消费进一步造成了雾霾等一系列环境问题^[11]。因此,控制京津冀地区能源消费总量,提高能源效率,缩小地区间差异对于生态环境的可持续发展及京津冀地区一体化发展具有重要意义。

作为两类重要资源,水和能源在生产过程中均需将对方作为原料,两者之间存在相互交织的复杂关系。目前,水-能源纽带相关研究正处于蓬勃发展阶段^[12-14],包括水资源-能源系统的内在机理探究^[15]、系统边界及系统间影响机制探讨^[15]、系统整合优化^[16-17]等方面,研究内容也由单纯的资源要素逐步拓展至资源-社会-经济-环境多系统的耦合,研究方法涉及投入产出法^[18]、生命周期法^[19-20]、生态网络分析^[18]、系统动力学^[21-22]、多主体建模^[23-24]、智能决策^[25-26]等。水-能源纽带相关研究已取得了很有价值的研究成果,同时仍需进一步完善和创新,尤其在资源强度精细核算和资源压力评价方面。鉴于此,本文在核算京津冀地区各部门水资源、能源以及两种资源相互消耗强度的基础上,对资源使用效率进行深入分析,并构建水-能源贸易间接消耗资源压力指数对贸易引发的资源压力进行定量化分析,以期对地区水资源、能源的可持续利用及未来发展规划的制定提供参考。

1 研究方法

1.1 体现资源强度核算

体现资源强度用于表征部门单位产值产品消耗的资源量,包括地区直接消耗及间接消耗的资源,其中,间接消耗的资源可能来源于本地其他部门的供给,或其他省份和其他国家的供给,而不同地区的资源利用效率存在差异。本文采用三层次投入产出法,在区别不同地区资源强度的基础上,核算研究区内各部门的资源强度。图1展示了资源在不同经济体之间的流通规律,对于研究区内部门*i*而言,存在以下平衡关系^[27]:

$$R_{mi} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m \varepsilon_{lkj} z_{lji} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m \varepsilon_{dkj} z_{dji} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m \varepsilon_{mkj} z_{mji} =$$

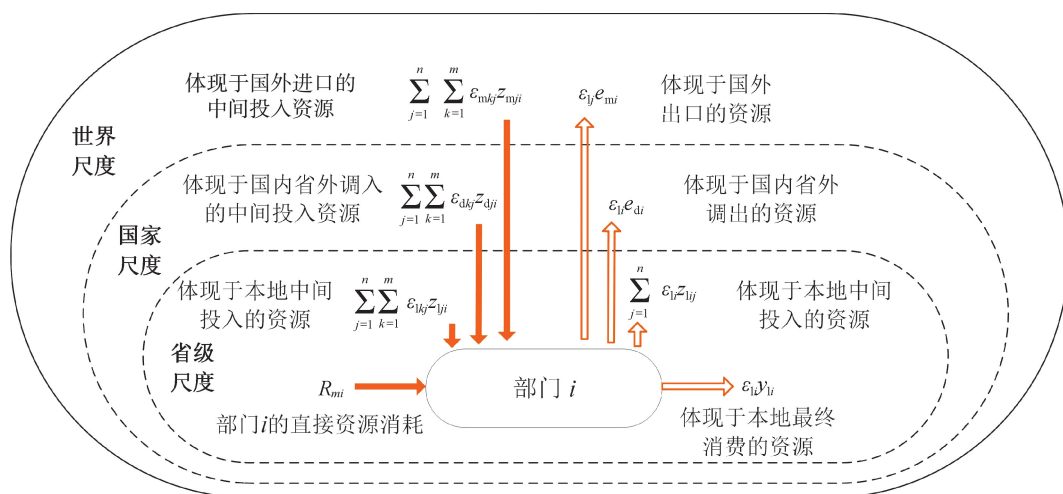


图1 体现资源流通特征

Fig.1 Flow characteristics of embodied resource

$$\varepsilon_{li} \left(\sum_{j=1}^n z_{lij} + y_{li} + e_{di} + e_{mi} \right) \quad (1)$$

式中: R_{mi} 为部门 i 的 m 种资源的直接使用量; ε_{lkj} 、 ε_{dkj} 、 ε_{mkj} 分别为本地其他部门、其他省份和其他国家的部门 j 的资源强度; ε_{li} 为部门 i 的三层次体现资源强度, 该强度值区别了本地消耗、省外及国外调入进口产品的资源强度; z_{lji} 、 z_{dji} 、 z_{mji} 分别为本地其他部门、其他省份和其他国家的部门 j 对研究区内部门 i 的中间投入量; z_{lij} 为研究区内部门 i 对部门 j 的中间投入量; y_{li} 为部门 i 的最终消费量; e_{di} 、 e_{mi} 分别为部门 i 的调出量和出口量; n 为部门数量。对式(1)进行处理^[28], 即可求得部门 i 的三层次体现资源强度:

$$\varepsilon_l = (R + \varepsilon_d Z_d + \varepsilon_m Z_m) X^{-1} (I - A)^{-1} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{其中} \quad R &= (R_{ki})_{m \times n} \quad \varepsilon_l = (\varepsilon_{lki})_{m \times n} \\ \varepsilon_d &= (\varepsilon_{dki})_{m \times n} \quad \varepsilon_m = (\varepsilon_{mki})_{m \times n} \quad Z_d = (z_{dji})_{n \times n} \\ Z_m &= (z_{mji})_{n \times n} \quad X = (x_{ij})_{n \times n} \\ A &= ZX^{-1} \quad Z = (z_{ji})_{n \times n} \end{aligned}$$

式中: X 为总产出矩阵, 当 $i=j$ 时, $x_{ij} = x_i$, x_i 为部门 i 的总经济产出; 当 $i \neq j$ 时, $x_{ij} = 0$; $(I - A)^{-1}$ 为列昂捷夫逆矩阵; z_{ji} 为系统内部部门 j 投入到系统内部部门 i 的经济量。将式(2)计算所得的三层次体现资源强度与对应部门的经济流通量相乘, 即可获得不同部门之间的资源流通量, 在此基础上, 将地区各部门的资源量汇总, 即可获得各地区之间的资源流通量。

本文核算的体现资源强度包括水资源、能源、能源隐含水和水资源隐含能 4 类。其中, 能源隐含水是指能源在生产加工过程中消耗的水资源量, 水资源隐含能则是指社会水循环过程中消耗的能量量, 两类资源分别以能源和水资源为载体, 流通于不同地区及行业部门之间。

1.2 资源压力分析

1.2.1 水资源压力评价

水资源压力指数指研究区内的取水量与本地可更新水资源量的比值, 用于表征水资源取用对于本地水资源造成的压力^[29], 计算公式为

$$I_w = \frac{W_d}{W_r} \quad (3)$$

式中: I_w 为水资源压力指数; W_d 为直接开采的水资源量; W_r 为可更新水资源量。参考 Zhao 等^[29]的研究, 本文构建了假定的水资源压力指数 I_w^* , 表征当假定外部净流入的水资源均由本部门开采时, 部门所承受的水资源压力, 计算公式为

$$I_w^* = \frac{W_d + W_{ni}}{W_r} = \frac{W_d + W_{di} - W_{do} + W_{fi} - W_{fo}}{W_r} \quad (4)$$

式中: W_{ni} 为体现水资源的净流入量; W_{di} 、 W_{do} 分别为体现水资源的省外调入量和调出量; W_{fi} 、 W_{fo} 分别为体现水资源的国外进口量和出口量。当 $I_w^* > I_w$ 时, 说明体现水的流入缓解了部门的水资源压力, 反之, 则加重了水资源压力。

能源隐含水同样可以借助于产品和服务而流通于各地区各部门之间, 它是水资源中与能源生产加工相关的一部分, 以 W_{eni} 表征能源隐含水的净流入量, 由能源隐含水贸易引起的水资源压力变化可表示为

$$I_{we} = \frac{W_{eni}}{W_r} = \frac{W_{edi} - W_{edo} + W_{efi} - W_{efo}}{W_r} \quad (5)$$

式中: I_{we} 为能源隐含水贸易引发的水资源压力指数; W_{edi} 、 W_{edo} 、 W_{efi} 和 W_{efo} 分别为能源隐含水的省外调入量、省外调出量、国外进口量和国外出口量。当 I_{we} 数值为正时, 说明能源隐含水的净流入缓解了部门的水资源压力, 反之, 则加重了水资源压力。

1.2.2 能源压力评价

各省份的能源探明储量数据难以获取, 因此选用能源开采量表征某省份的能源禀赋条件, 构建能源压力指数 I_E , 以表征能源使用对本地能源造成的压力, 具体指研究区内由本地开采且由本地直接消费的能源量 E_c 与能源开采量 E_d 的比值:

$$I_E = \frac{E_c}{E_d} \quad (6)$$

在 I_E 的基础上, 进一步构建假定的能源压力指数 I_E^* , 用于表征当假定从省外和国外净流入的体现能源均是由本地提供时对应的能源压力, 计算公式为

$$I_E^* = \frac{E_c + E_{ni}}{E_d} = \frac{E_c + E_{di} - E_{do} + E_{fi} - E_{fo}}{E_d} \quad (7)$$

式中: E_{ni} 为体现能源的净流入量; E_{di} 、 E_{do} 分别为体现能源的省外调入量和调出量; E_{fi} 、 E_{fo} 分别为体现能源的国外进口量和出口量。当 $I_E^* > I_E$ 时, 说明体现能源的流入缓解了部门的能源使用压力, 反之, 则加重了能源使用压力。

水资源隐含能同样可以借助于产品或服务而流通于各地区各部门之间, 它是能源中与水资源开采处理相关的一部分, 以 E_{wni} 表示水资源隐含能的净流入量, 由水资源隐含能流通引起的能源压力变化可表示为

$$I_{Ew} = \frac{E_{wni}}{E_d} = \frac{E_{wdi} - E_{wdo} + E_{wfi} - E_{wfo}}{E_d} \quad (8)$$

式中: I_{Ew} 为水资源隐含能贸易引发的能源压力指数; E_{wdi} 、 E_{wdo} 、 E_{wfi} 和 E_{wfo} 分别为水资源隐含能的省外调入量、省外调出量、国外进口量和国外出口量。当

I_{Ew} 数值为正时,说明水资源隐含能的净流入缓解了部门的能源压力,反之,则加重了能源压力。

2 数据来源

水资源数据、能源数据和投入产出数据 3 类主要数据中,水资源数据包括农业、工业、生活和生态用水 4 类,世界层次、中国层次和省级层次数据分别来源于世界银行统计数据、中国水资源公报^[30]以及京津冀的地方水资源公报。能源数据包括原煤、原油、天然气、水电、核电及风电 6 类,各层次数据分别来源于 BP 世界能源统计年鉴、中国能源统计年鉴^[31]和京津冀的地方能源统计年鉴。投入产出的各层次数据分别来源于 Eora 数据库^[32]、中国投入产出表和京津冀的地方投入产出表,投入产出表由国家统计局及相应的地方统计局颁布。此外,还需要中国地区间投入产出表^[33]以探究资源在各省份间的流通状况。值得注意的是,2012 年中国地区间投入产出表是可获取的最新版本,为保持数据年限的一致性,本文中的各类数据均选用 2012 年统计数据。

3 结果与分析

3.1 京津冀各部门资源强度分析

3.1.1 体现水强度

为了方便结果的展示,按照行业属性,将国民经济系统中 42 个行业合并为农业(S1)、矿业(S2)、制

造业(S3)、电力及燃气的生产和供应业(S4)、水的生产和供应业(S5)、建筑业(S6)和服务及运输业(S7)七大类,具体分类标准可参考文献[34-35]。各行业部门的体现水强度和体现能源强度计算结果见表 1。由表 1 可知,京津冀三地各部门间的强度值差异较大:①S5 的体现水强度显著高于其他部门,在京津冀三地分别为 2 976.61 m³/万元、2 890.33 m³/万元和 6 094.18 m³/万元,原因是地区经济发展中绝大部分的工业用水、生活用水和生态用水均是由该部门提供,因此单位产值消耗的水资源量最大;②S1 的体现水强度位居第二位,用水主要体现在于农田灌溉的直接消耗;③S4 和 S3 的体现水强度次之,对于制造业而言,其中的食品烟草业和纺织业是农业的重要下游产业,与农业存在紧密的经济关联,水资源以农产品为载体,流入下游产业之中,因此直接使用部分占比较小;④S7 的体现水强度在京津冀三地均相对较低,表明单位产值产品的耗水量较少,水资源利用效率较高,属于节水型行业部门。整体上看,农业(S1)及第二产业(S2~S6)的体现水强度普遍高于第三产业(S7)。

地区全行业平均体现水强度由各部门强度值以部门产值为权重加权求得。京津冀三地的全行业平均体现水强度分别为 69.90 m³/万元、68.51 m³/万元和 103.13 m³/万元。从构成来看,三地体现于本地使用的比重差异较大,北京和天津分别为 15.01%和 18.57%,河北则达到 52.09%。北京和天津属于

表 1 京津冀各部门体现水强度与体现能源强度

Table 1 Embodied water intensity and embodied energy intensity in all sectors in Beijing-Tianjin-Hebei region

地区	行业	体现水强度/(m ³ ·万元 ⁻¹)				能源隐含水强度/ (m ³ ·万元 ⁻¹)	体现能源强度/(GJ·万元 ⁻¹)				水资源隐含能强度/ (GJ·万元 ⁻¹)
		本地使用	国内调入	国外进口	总计		本地使用	国内调入	国外进口	总计	
北京	S1	254.95	88.49	134.67	478.12	6.75	1.20	15.96	5.97	23.13	1.09
	S2	1.76	42.74	7.56	52.06	48.81	4.39	107.01	5.65	117.05	0.80
	S3	5.93	51.13	25.66	82.72	9.30	0.02	19.51	12.70	32.22	0.83
	S4	12.84	134.38	5.42	152.64	47.09	0.26	73.73	16.36	90.35	2.94
	S5	2 907.86	54.86	13.89	2 976.61	12.10	0.03	22.62	3.36	26.01	64.26
	S6	5.83	51.09	11.85	68.77	11.47	0.01	28.04	3.87	31.91	0.94
	S7	4.41	28.56	10.07	43.04	4.62	0.01	11.32	2.82	14.14	0.47
天津	S1	330.15	75.97	24.17	430.29	5.31	3.77	9.30	3.83	16.90	1.24
	S2	2.85	18.36	6.17	27.39	11.98	51.77	8.92	4.18	64.87	0.42
	S3	10.43	46.04	18.00	74.47	7.45	5.05	11.61	5.02	21.69	0.80
	S4	18.19	57.68	8.37	84.24	17.75	7.10	25.40	3.89	36.38	1.53
	S5	1 562.09	1 322.28	5.97	2 890.33	14.28	1.05	22.43	2.02	25.51	62.93
	S6	4.08	42.53	7.15	53.77	8.88	1.93	19.43	3.12	24.48	0.80
	S7	6.38	37.65	7.69	51.72	4.01	3.04	8.00	1.60	12.64	0.66
河北	S1	325.16	32.81	5.77	363.74	3.63	5.40	8.60	0.43	14.43	0.79
	S2	17.41	35.85	2.94	56.20	18.99	48.69	26.62	2.35	77.67	1.01
	S3	38.24	52.03	4.55	94.83	11.59	12.10	26.61	1.90	40.61	1.24
	S4	79.24	85.56	1.20	166.01	29.29	35.07	56.41	1.07	92.56	3.40
	S5	5 555.39	537.85	0.94	6 094.18	10.53	5.50	19.71	0.46	25.67	124.00
	S6	17.53	48.19	2.08	67.80	9.19	8.20	21.13	1.39	30.72	1.20
	S7	13.68	31.53	1.12	46.34	4.74	3.90	11.99	0.27	16.15	0.71

资源型及水质型缺水地区,体现水强度较低,地区通过不断改良生产技术提高用水效率,且通过贸易的形式将用水压力转移至其他省份和国外。河北的体现水强度相对较高,且体现于直接使用部分的比重较大,水资源压力主要表现为本地水资源消费,相比于京津地区,水资源利用效率有待进一步提升。

能源隐含水强度因部门而异,同时因地区而异,其数值反映了能源生产及加工过程中对水资源的利用效率。京津冀三地中,河北的行业平均能源隐含水强度值最大,达 $10.75 \text{ m}^3/\text{万元}$,北京次之($10.63 \text{ m}^3/\text{万元}$),天津最小($7.09 \text{ m}^3/\text{万元}$),可见天津全行业的能源用水效率高于北京和河北。各部门中,S2 和 S4 的能源隐含水强度值较大,多为与能源开采加工直接相关的部门。

3.1.2 体现能源强度

由表 1 可知,京津冀三地各部门的体现能源强度差异也较大:①S2 和 S4 的体现能源强度较大,隶属于 S2 的煤炭采选业和 S4 的电力、热力生产和供应属于一次能源开采行业,较高的强度体现为对资源的直接消耗(河北)以及外部资源的大量调入或进口(北京和天津);②隶属于 S4 的燃气生产和供应业和 S3 的石油加工业和非金属矿制造业在生产过程中消耗了大量的能源密集型产品,属于能源开采行业的重要下游加工部门,对能源的使用施加了间接压力;③S7 的体现能源强度在京津冀三地均相对较低,说明单位产值产品的能耗较低,属于非能源密集型产业。对比发现,第二产业各部门(S2 ~ S6)的体现能源强度普遍高于第三产业(S7),说明相比

于工业,服务业整体上对能源的依赖性较低。京津冀三地的全行业平均体现能源强度分别为 $28.58 \text{ GJ}/\text{万元}$ 、 $22.84 \text{ GJ}/\text{万元}$ 和 $38.29 \text{ GJ}/\text{万元}$,与水资源相似,天津的能源利用效率在三地中位居首位,河北的能源利用效率则相对较低。京津冀三地体现于本地使用的比重差距悬殊,分别为 0.97% 、 34.62% 和 36.43% ,相比于天津($1.17 \times 10^{18} \text{ J}$)和河北($2.74 \times 10^{18} \text{ J}$),北京能源开采量较低($1.05 \times 10^{17} \text{ J}$),在全国范围内仅高于上海和海南,因此本地使用占比较小,直接及间接能源使用对省外和国外的依存度极高。

水资源隐含能强度同样因行业和地区而异,该强度代表了水资源生产、净化及运输等过程对能源的利用效率,河北的行业平均强度值最大($1.22 \text{ GJ}/\text{万元}$),北京次之($0.86 \text{ GJ}/\text{万元}$),天津最小($0.81 \text{ GJ}/\text{万元}$),可见北京和天津地区的水资源耗能效率相对较高,河北的利用效率有待提升。各部门中,S5 在工业、生活及生态用水的处理过程中消耗了大量的能源,因此水资源隐含能强度显著高于其他部门。

3.2 京津冀地区资源的“源-汇”分析

3.2.1 水资源

由前文分析可知,地区中各部门实际消耗的资源,可能源于本地资源的直接消耗,也可能隐含于省外调入及国外进口的产品或服务之中。经过一系列生产加工过程,这些资源可能被直接消费,也可能以产品或服务为载体流向其他省份或国家。图 2 以流量的表达方式,抽象了水资源流入和流出各地区的

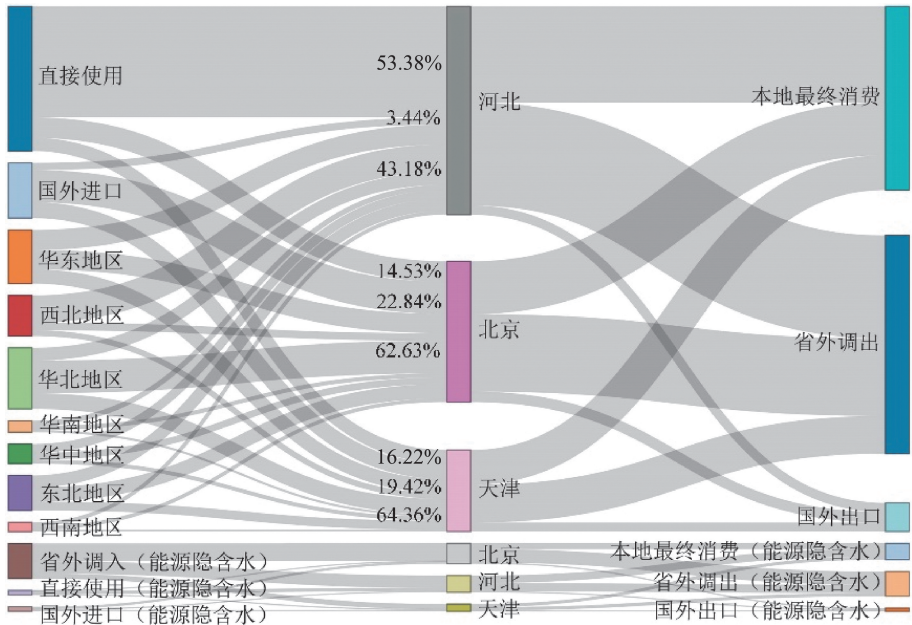


图 2 京津冀地区体现水的“源”与“汇”

Fig.2 Source and sink of embodied water in Beijing-Tianjin-Hebei region

过程,柱体之间连边宽度对应资源流通量,图中数字由上至下分别代表各地区的直接使用、国外进口和省外调入资源量的百分比(图3与之相同)。对于某一地区而言,直接使用、省外调入和国外进口3项之和与本地最终消费、省外调出和国外出口3项之和相等。值得注意的是,本文中“直接使用”部分的资源指的是由自然界直接获取并进入经济系统中的水资源和能源,当实体资源发生省际贸易时,此部分资源则归入“省外调入”的范畴。

在水资源“来源”方面,京津冀三地中,河北的水资源直接使用量最高(占比为53.38%),为195.30亿 m^3 ,达京津两地之和的3.3倍,而河北的国外进口量却最低(占比为3.44%),仅为12.57亿 m^3 ,仅为天津(27.79亿 m^3)的一半,北京(56.45亿 m^3)的1/4。在省外调入方面,河北的省外调入量最高(157.94亿 m^3),北京次之(154.77亿 m^3),天津最低(92.10亿 m^3),在三地总量中的占比分别为43.18%、62.63%和64.36%。对于不同地理分区而言,北京和天津省外调入的主要来源是华北地区,调入量分别为36.98亿 m^3 和29.98亿 m^3 ,占据总量的30%左右,其次是华东地区和东北地区,调入量之和均占总量的40%左右;河北省外调入的最主要来源是西北地区,调入量占据省外调入总量的30%以上。农业体现水在体现水总量中占据较大比例,对体现水的省际流通起到主导作用;黑龙江是我国东北地区的粮食生产大省,粮食产量位居全国首位,华北地区是水稻和绿色粮油产品的主要销售地区,北京、天津来自黑龙江省的水稻市场占有率超过

3/4,因此,几个省份间产生了紧密联系。此外,新疆的农产品也向北京、天津、河北三省市供给,且新疆的体现水强度较大,随之形成了较大的体现水贸易流通量。

在“去向”方面,省外调出在京津冀三地均占据较大比例,其中河北最大(180.83亿 m^3),北京次之(135.92亿 m^3),天津最小(66.38亿 m^3)。本地最终消费次之,在京津冀三地的占比分别为37.54%、42.64%和46.14%。国外出口部分的占比最小,在京津冀三地输出端的占比分别为7.46%、10.96%和4.42%。对比资源的国内外流通量,京津冀三地的体现水净流入量分别为56.87亿 m^3 、37.82亿 m^3 和-26.50亿 m^3 ,其中,北京和天津受限于资源禀赋条件,倾向于调入原产品和最终消费品,其经济和资源之间的脱钩发展得益于将水资源密集型产品的生产转移至其他省份。河北省体现水调出省份中,北京和天津分别以20.29亿 m^3 和11.22亿 m^3 位居第二位和第六位,为京津地区用水安全提供了保障。

在能源耗水方面,北京的能源耗水量最大(35.65亿 m^3),河北次之(29.32亿 m^3),天津最小(12.64亿 m^3),北京、河北和天津三地能源隐含水量分别占体现水总量的14.43%、8.83%和8.01%,可见提高能源用水效率对于节约水资源具有较大潜力。

3.2.2 能源

图3为能源在京津冀地区的流入流出情况。由图3可知,北京的能源直接使用量极低(占比

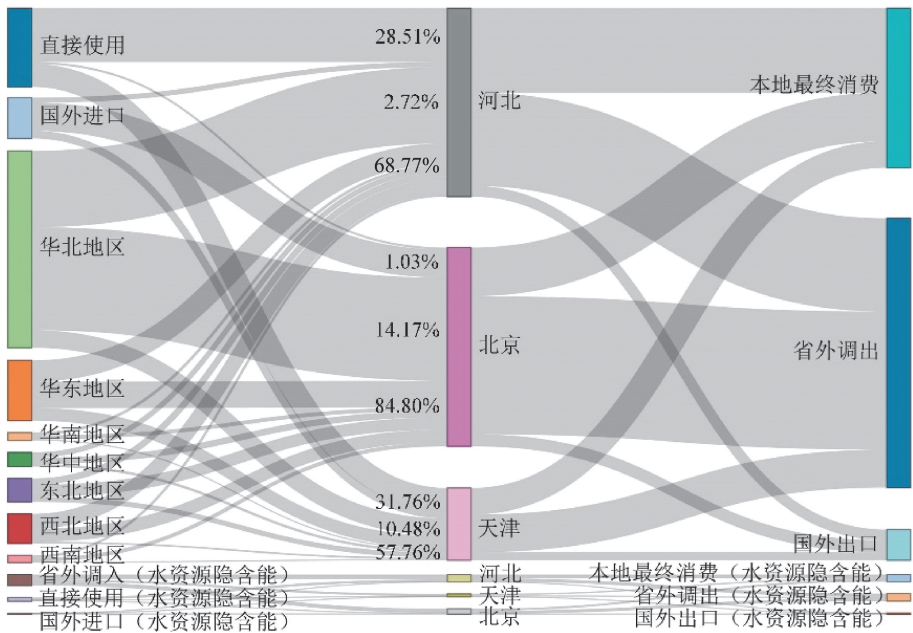


图3 京津冀地区体现能源的“源”与“汇”

Fig. 3 Source and sink of embodied energy in Beijing-Tianjin-Hebei region

1.03%), 仅为 1.05×10^{17} J, 占京津冀总量的 2.60%; 天津的直接使用量为 1.17×10^{18} J, 占总量的 29.18%; 河北的直接使用量最高(占比 28.51%), 达 2.74×10^{18} J, 达到京津之和的 2.15 倍。在国外进口方面, 北京的能源进口量最大(占比 14.17%), 达 1.44×10^{18} J, 天津次之(3.87×10^{17} J), 河北最小(2.61×10^{17} J)。在省外调入方面, 京津冀三地省外调入量在总量中的占比分别为 84.80%、57.76% 和 68.77%, 从不同地理分区看, 华北、华东和西北地区是京津冀地区省外调入的主要源地, 调入量达省外调入总量的 84.42%, 其中, 晋陕蒙地区煤炭丰富, 凭借着优越的资源禀赋条件和地理优势, 向以首都北京为核心的京津冀经济圈持续稳定地供给能源。作为中国北方经济的重要核心区, 京津冀地区需要消耗大量的能源以满足自身经济的发展, 尤其是以重化工业为核心的河北省, 其煤炭需求量居高不下。虽然受限于雾霾治理等环境因素的限制, 京津冀地区煤炭消耗量增速有所放缓, 但三地内部的能源生产能力有限, 依旧需要外部地区的持续补给, 形成了京津冀三个省市之间的资源集聚。对华东地区而言, 能源禀赋条件较差, 产量低, 但地区经济发展水平高, 能源则多以中间品和最终消费品的形式进入京津冀地区, 这种特性使能源在整个中国范围内呈现广域性的大规模流动。

省外调出是京津冀地区体现能源的主要去向, 占总流出量的 58.60%。其中, 北京的数值最大

(7.06×10^{18} J), 河北次之(4.77×10^{18} J), 天津最小(1.93×10^{18} J); 本地最终消费次之, 在京津冀三地的占比分别为 24.48%、36.74% 和 44.75%; 国外出口部分的占比最小。京津冀三地的体现能源净流入量分别为 2.38×10^{18} J、 1.84×10^{17} J 和 1.56×10^{18} J, 京津冀地区资源禀赋条件有限, 外部地区提供的实体能源和隐含于产品及服务中的能源缓解了地区经济高速发展所带来的能源压力, 为首都经济圈稳定发展提供了有力保障。

在水耗能源方面, 京津冀三地水资源隐含能分别占体现能源总量的 2.75%、4.14% 和 3.94%。河北的水资源隐含能最大(3.79×10^{17} J), 北京次之(2.80×10^{17} J), 天津最小(1.53×10^{17} J)。相比于能源隐含水, 水资源隐含能对能源总量的影响较弱, 水-能源纽带关系中, 能源耗水占据主导地位。

3.3 贸易引发的资源压力分析

3.3.1 体现水与能源隐含水贸易

水资源及能源以产品或服务的形式流通于不同地区和部门之间。表 2 给出了京津冀三地各部门的水资源压力指数。对比发现, 水资源压力指数在京津冀不同地区和部门之间均存在较大差异。 I_w 在 S1 和 S5 中较高。当部门的 $I_w^* > I_w$ 时, 说明体现水的净流入缓解了部门的水资源压力, 对比发现, 在北京和天津, 体现水贸易对水资源压力的缓解作用显著强于河北, 其中又以北京的缓解作用更强。各部

表 2 京津冀各部门水资源压力指数及能源压力指数

Table 2 Water stress indexes and energy stress indexes in all sectors in Beijing-Tianjin-Hebei region

地区	行业	水资源压力指数			能源压力指数		
		I_w	I_w^*	I_{we}	I_E	I_E^*	I_{Ew}
北京	S1	0.235 4	0.325 8	0.000 9	0.000 0	0.124 0	-0.001 8
	S2	0.002 1	0.005 9	0.000 6	0.000 0	0.101 7	-0.005 7
	S3	0.075 9	0.440 8	0.039 5	0.000 0	6.244 8	0.049 8
	S4	0.046 0	0.167 3	0.051 3	0.026 8	5.365 3	0.085 7
	S5	0.405 1	0.408 8	0.001 0	0.000 0	0.073 1	0.001 8
	S6	0.000 0	0.510 2	0.093 7	0.000 0	9.620 5	0.254 4
	S7	0.144 3	0.795 7	0.054 0	0.000 0	6.989 6	0.123 5
天津	S1	0.355 6	0.422 5	0.002 6	0.000 0	0.019 7	0.001 4
	S2	0.005 2	0.012 8	-0.020 3	0.000 0	0.022 9	0.000 1
	S3	0.117 8	0.602 9	0.054 7	0.000 0	0.444 0	0.008 0
	S4	0.032 0	0.130 4	0.027 6	0.000 8	0.123 5	0.005 1
	S5	0.152 0	0.258 6	0.001 0	0.000 0	0.004 4	0.006 2
	S6	0.000 0	0.225 6	0.042 1	0.000 0	0.332 4	0.009 5
	S7	0.042 6	0.381 9	0.005 6	0.000 0	0.107 6	0.009 7
河北	S1	0.606 8	0.425 9	-0.000 2	0.000 0	0.000 0	-0.002 4
	S2	0.012 3	0.053 2	0.009 8	0.445 5	0.683 8	0.006 3
	S3	0.040 4	0.074 8	-0.000 1	0.000 0	0.477 2	-0.007 4
	S4	0.054 4	0.114 4	0.014 9	0.009 8	0.348 6	0.010 2
	S5	0.099 4	0.107 9	0.000 1	0.000 0	0.001 4	0.001 5
	S6	0.000 0	0.038 0	0.003 3	0.000 0	0.074 4	0.005 7
	S7	0.016 1	0.079 0	0.003 0	0.000 0	0.076 0	0.008 7

门中,以 S3、S6 和 S7 的缓解作用最强,其 $I_{W_e}^*$ 数值远高于 I_W ,说明外部体现水的流入极大缓解了部门的用水压力,若这部分净流入的水资源是由本部门提供的,将造成极大的用水压力。相比之下,除农业外,河北省各部门的水资源压力指数较低,且体现水流通对各部门水资源压力的缓解作用不强。

表 2 中,京津冀三地中仍以北京的 I_{W_e} 数值较大,即能源贸易对各部门水资源压力的缓解作用较强,各部门的指数均为正,其中以 S6 的数值最大,该部门的发展需要投入大量的建筑材料,包括钢材、混凝土以及工程设备等,这些原材料在生产加工过程中均需要消耗大量的能源,而这部分能源在生产加工过程中仍旧需要消耗水资源,因此水资源净流入量较大。对于天津和河北而言,因能源贸易而缓解用水压力的部门数量分别为 6 个和 5 个,数量和程度均低于北京。

3.3.2 体现能源与水资源隐含能贸易

表 2 给出了京津冀三地各部门的能源压力指数。对于三地而言,北京和天津的能源直接开采量均比较低,因此各部门的 I_E 指数较低,仅以河北的矿业(S2)处于中等压力水平。对于 I_E^* 指数而言,对比发现,体现能源贸易对北京各部门能源压力的缓解作用显著强于天津和河北,其中, S3、S4、S6 和 S7 的作用效果都非常显著,以上部门中,能源多以中间品和最终消费品的形式进入北京,极大程度地缓解了地区的能源使用压力。相比之下,体现能源贸易对天津和河北各部门的资源压力均有所缓解,但作用程度相对较弱。 I_E^* 指数值较大的部门多以第二产业为主,说明相比于第三产业,工业对间接能源的吸纳作用更强,省际及国际贸易对京津冀地区能耗压力起到了较强的缓解作用。

将 $I_{E_{W_e}}$ 指数值与 I_E 和 I_E^* 指数值进行对比,发现水资源贸易对能源压力的影响作用较弱,其中仍以北京的影响相对较强。各部门中, S6 和 S7 的 $I_{E_{W_e}}$ 相对较大,具体表现为建筑生产和发电供热中水与能源的相互消耗。天津各部门的 $I_{E_{W_e}}$ 指数均为正,即水资源贸易缓解了各部门的能耗压力,但作用强度较弱。与前文对比可知,体现水贸易对京津冀地区能源压力的影响要显著低于体现能源贸易对水资源压力的影响,说明能源耗水在水-能源纽带关系中起到主导作用。综合来看,水资源与能源贸易对本地资源压力的缓解程度北京最大,河北最小,天津居中。

4 结 论

a. 京津冀三地全行业平均体现水强度分别为 $69.90 \text{ m}^3/\text{万元}$ 、 $68.51 \text{ m}^3/\text{万元}$ 和 $103.13 \text{ m}^3/\text{万元}$;

能源隐含水强度分别为 $10.63 \text{ m}^3/\text{万元}$ 、 $7.09 \text{ m}^3/\text{万元}$ 和 $10.75 \text{ m}^3/\text{万元}$,与体现能源强度呈现较高的部门相似性。京津冀三地行业平均体现能源强度分别为 $28.58 \text{ GJ}/\text{万元}$ 、 $22.84 \text{ GJ}/\text{万元}$ 和 $38.29 \text{ GJ}/\text{万元}$,水资源隐含能强度分别为 $0.86 \text{ GJ}/\text{万元}$ 、 $0.81 \text{ GJ}/\text{万元}$ 和 $1.22 \text{ GJ}/\text{万元}$,与体现水强度呈现较高的部门相似性。资源强度体现于本地使用的比重河北最大,北京最小;资源利用效率天津最高,河北最低。

b. 京津冀三地的体现水净流入量分别为 56.87 亿 m^3 、 37.82 亿 m^3 和 -26.50 亿 m^3 ,北京和天津受限于资源禀赋条件,倾向于调入原产品和最终消费品,其经济和资源之间的脱钩发展得益于将水资源密集型产品的生产转移至其他省份。京津冀三地的体现能源净流入量分别为 $2.38 \times 10^{18} \text{ J}$ 、 $1.84 \times 10^{17} \text{ J}$ 和 $1.56 \times 10^{18} \text{ J}$,外部流入能源缓解了地区经济高速发展所带来的能源压力,为首都经济圈稳定发展提供了有力保障。

c. 体现水贸易对北京和天津水资源压力的缓解作用显著强于河北,其中又以北京的缓解作用更强,且以制造业、建筑业和服务及运输业的作用效果最为显著。体现能源贸易分别缓解了京津冀地区 7、6 和 5 个部门的水资源压力,且以北京各部门的缓解作用最强。体现能源贸易对北京能源压力的缓解作用显著强于天津和河北,其中以建筑业、服务及运输业、制造业的缓解作用最强;虽然天津及河北各部门的能源压力均得到了缓解,但作用程度较弱。体现水贸易对京津冀地区能源压力的影响要显著低于体现能源贸易对水资源压力的影响,能源耗水在水-能纽带关系中起主导作用。

参考文献:

[1] 薛英岚,陈岩,曾维华. 流域上下游水资源与水污染冲突评估:基于水足迹-粗糙集理论[J]. 水利经济,2020,38(6):43-49. (XUE Yinglan, CHEN Yan, ZENG Weihua. Assessment of conflicts of water resources and pollution between upstream and downstream in a basin based on water footprints and rough sets[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2020, 38(6):43-49. (in Chinese))

[2] 王红瑞,洪思扬,秦道清. 干旱与水资源短缺相关问题探讨[J]. 水资源保护,2017,33(5):1-4. (WANG Hongrui, HONG Siyang, QIN Daoqing. Discussion on related issues of drought and water shortage[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5):1-4. (in Chinese))

[3] 左其亭,张志卓,吴滨滨. 基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J]. 水资源保护,2020,36(2):1-7. (ZUO Qiting, ZHANG Zhizhuo, WU Binbin. Evaluation of water resources carrying capacity of

- nine provinces in Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model[J]. Water Resources Protection, 2020,36(2):1-7. (in Chinese))
- [4] 徐翔宇, 酆建强, 金菊良, 等. 基于风险矩阵的多要素水资源承载力综合评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(1): 1-9. (XU Xiangyu, LI Jianqiang, JIN Juliang, et al. Comprehensive evaluation method of multi-factor water resources carrying capacity based on risk matrix[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(1): 1-9. (in Chinese))
- [5] 项潇智, 贾绍凤. 中国能源产业的现状需水估算与趋势分析[J]. 自然资源学报, 2016, 31(1): 114-123. (XIANG Xiaozhi, JIA Shaofeng. Estimation and trend analysis of water demand of energy industry in China[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(1): 114-123. (in Chinese))
- [6] 王雷, 朱吉茂, 高俊莲. 能源与水源的纽带关系研究: 以鄂尔多斯市为例[J]. 生态经济, 2020, 36(9): 158-163. (WANG Lei, ZHU Jimao, GAO Junlian. Research on the energy-water nexus: a case study of Ordos [J]. Ecological Economy, 2020, 36(9): 158-163. (in Chinese))
- [7] 田泽, 潘晶晶, 任芳容. 基于 DEA 的长江经济带省际水电源效率评价及提升方向[J]. 水利经济, 2020, 38(4): 1-7. (TIAN Ze, PAN Jingjing, REN Fangrong. Evaluation and improvement direction of inter-provincial hydropower energy efficiency in Yangtze River Economic Belt based on DEA[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2020, 38(4): 1-7. (in Chinese))
- [8] 曹俊文, 方晓娟. 京津冀水资源消耗时空差异的驱动效应研究[J]. 统计与决策, 2020, 36(6): 54-58. (CAO Junwen, FANG Xiaojuan. Research on the driving effect of time-space difference of water consumption in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Statistics & Decision, 2020, 36(6): 54-58. (in Chinese))
- [9] 周斌, 桑学锋, 秦天玲, 等. 我国京津冀地区良性水资源调控思路及应对策略[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(3): 6-10. (ZHOU Bin, SANG Xuefeng, QIN Tianling, et al. Regulation ideas and coping strategies of virtuous water resources in Beijing-Tianjin-Hebei region of China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(3): 6-10. (in Chinese))
- [10] 刘登伟. 京津冀大都市圈水资源短缺风险评价[J]. 水利发展研究, 2010, 10(1): 20-24. (LIU Dengwei. Risk assessment of water shortage in Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan area [J]. Water Resources Development Research, 2010, 10(1): 20-24. (in Chinese))
- [11] 李娅坤. 基于 SBM-VECM 的京津冀能源效率差异分析与发展策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [12] 孙才志, 郝帅, 赵良仕. 中国水资源-能源-粮食纽带系统效率时空分异特征[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 61-68. (SUN Caizhi, HAO Shuai, ZHAO Liangshi. Study on evaluation of water-energy-food nexus system efficiency and its spatial-temporal differentiation in China[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 61-68. (in Chinese))
- [13] 刘钢, 王金秋, 杨仕亮. 考虑水-能-粮纽带关系的中国生物质能产业发展对策[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2020, 22(5): 42-51. (LIU Gang, WANG Jinqiu, YANG Shiliang. Research on China's bioenergy industry development strategy under WEF Nexus [J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Socail Sciences), 2020, 22(5): 42-51. (in Chinese))
- [14] 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))
- [15] 赵良仕, 刘思佳, 孙才志. 黄河流域水-能源-粮食安全系统的耦合协调发展研究[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 69-78. (ZHAO Liangshi, LIU Sijia, SUN Caizhi. Study on coupling and coordinated development of water-energy-food security system in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 69-78. (in Chinese))
- [16] NHAMO L, MABHAUDHI T, MPANDELI S, et al. An integrative analytical model for the water-energy-food nexus: south Africa case study[J]. Environmental Science and Policy, 2020, 109: 15-24.
- [17] GAUDARD L, AVANZI F, MICHELE C D. Seasonal aspects of the energy-water nexus: the case of a run-of-the-river hydropower plant [J]. Applied Energy, 2018, 210(15): 604-612.
- [18] WANG S G, FATH B, CHEN B. Energy-water nexus under energy mix scenarios using input-output and ecological network analyses [J]. Applied Energy, 2019, 233-234: 827-839.
- [19] CHEN C F, FENG K L, MA H. Uncover the interdependent environmental impacts associated with the water-energy-food nexus under resource management strategies [J]. Resources Conservation and Recycling, 2020, 160: 104909.
- [20] MEKONNEN M, GERBENS P, HOEKSTRA A. The consumptive water footprint of electricity and heat: a global assessment[J]. Environmental Science Water Research & Technology, 2015, 1(3): 285-297.
- [21] 米红, 周伟. 未来 30 年我国粮食、淡水、能源需求的系统仿真[J]. 人口与经济, 2010(1): 1-7. (MI Hong, ZHOU Wei. The system simulation of China's grain, fresh water and energy demand in the next 30 years [J]. Population & Economics, 2010(1): 1-7. (in Chinese))
- [22] 李桂君, 李玉龙, 贾晓菁, 等. 北京市水-能源-粮食可持续发展系统动力学模型构建与仿真[J]. 管理评论, 2016, 28(10): 11-26. (LI Guijun, LI Yulong, JIA Xiaojing, et al. Establishment and simulation study of system dynamic model on sustainable development of

- water-energy-food nexus in Beijing [J]. Management Review, 2016, 28(10): 11-26. (in Chinese))
- [23] KHAN H F. A coupled modeling framework for sustainable watershed management in transboundary river basins[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2017, 21(12): 1-28.
- [24] KARLBERG L, HOFF H, AMSALU T. Tackling complexity: understanding the food-energy-environment nexus in Ethiopia's Lake Tana Sub-basin [J]. Water Alternatives, 2015, 8(1): 710-734.
- [25] HELMBRECHT J, PASTOR J, MOYA C. Smart solution to improve water-energy nexus for water supply systems[J]. Procedia Engineering, 2017, 186: 101-109.
- [26] ZHANG X D, VESSELINOV V. Energy-water nexus: balancing the tradeoffs between two-level decision makers [J]. Applied Energy, 2016, 183: 77-87.
- [27] SHAO L, GUAN D B, WU Z, et al. Multi-scale input-output analysis of consumption-based water resources: method and application [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 164: 338-346.
- [28] 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.
- [29] ZHAO X, LIU J G, LIU Q Y, 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] 中华人民共和国水利部. 2013 年中国水资源公报 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [31] 国家统计局能源司. 2013 年中国能源统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [32] LENZEN M, MORAN D, KANEMOTO K, et al. Building Eora: a global multiregion input-output database at high country and sector resolution [J]. Economic Systems Research, 2013, 25: 20-49.
- [33] WANG S G, LIU Y T, CHEN B. Multiregional input-output and ecological network analyses for regional energy-water nexus within China [J]. Applied Energy, 2018, 227: 353-364.
- [34] 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 [J]. Applied Energy, 2016, 178: 773-783.
- [35] WANG S G, CAO T, CHEN B. Urban energy-water nexus based on modified input-output analysis [J]. Applied Energy, 2017, 196: 208-217.

(收稿日期: 2020-10-23 编辑: 雷 燕)

(上接第 88 页)

- [54] BERG P, DELGARD M L, POLSENAERE P, et al. Dynamics of benthic metabolism, O_2 , and pCO_2 in a temperate seagrass meadow [J]. Limnology and Oceanography, 2019, 64(6): 2586-2604.
- [55] JASSBY A D, PLATT T. Mathematical formulation of the relationship between photosynthesis and light for phytoplankton [J]. Limnology and Oceanography, 1976, 21(4): 540-547.
- [56] BERG P, LONG M H, HUETTEL M, et al. Eddy correlation measurements of oxygen fluxes in permeable sediments exposed to varying current flow and light [J]. Limnology and Oceanography, 2013, 58(4): 1329-1343.
- [57] BURNETT W C, AGGARWAL P K, AURELI A, et al. Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods [J]. Science of the Total Environment, 2006, 367(2/3): 498-543.
- [58] 林若兰, 卓文珊, 曾珂, 等. 不同风向对珠江东四口门盐水入侵的影响 [J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 66-75. (LIN Ruolan, ZHUO Wenshan, ZENG Ke, et al. Influence of different wind direction on saltwater intrusion in East four portals of Pearl River [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 66-75. (in Chinese))
- [59] 朱新丽, 金光球, 姜启豪, 等. 侧向潜流交换水动力过程及生态环境效应 [J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(3): 15-21. (ZHU Xinli, JIN Guangqiu, JIANG Qihao, et al. Processes of lateral hyporhelic exchange and its environment effects [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(3): 15-21. (in Chinese))
- [60] CRUSIUS J, BERG P, KOOPMANS DJ, et al. Eddy correlation measurements of submarine groundwater discharge [J]. Marine Chemistry, 2008, 109(1/2): 77-85.
- [61] 李红, 高增文, 秦志新, 等. 分层小水库沉积物-水界面热交换时空变化特征 [J]. 水资源保护, 2019, 35(1): 63-69. (LI Hong, GAO Zengwen, QIN Zhixin, et al. Temporal and spatial characteristics of heat exchange at sediment-water interface in a small stratified reservoir [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(1): 63-69. (in Chinese))
- [62] KOHLBACH D, GRAEVE M A, LANGE B, et al. The importance of ice algae-produced carbon in the central arctic ocean ecosystem: food web relationships revealed by lipid and stable isotope analyses [J]. Limnology and Oceanography, 2016, 61(6): 2027-2044.
- [63] BOETIUS A, ALBRECHT S, BAKKER K, et al. Export of algal biomass from the melting arctic sea ice [J]. Science, 2013, 339(6126): 1430-1432.
- [64] ATTARD K M, SØGAARD D H, PIONTEK J, et al. Oxygen fluxes beneath arctic land-fast ice and pack ice: towards estimates of ice productivity [J]. Polar Biology, 2018, 41(10): 1-16.

(收稿日期: 2020-08-07 编辑: 熊水斌)