

石油开发利用的水资源稀缺性评价研究

冯翠洋*, 赵佳龙, 尹琳琳

中国矿业大学(北京)管理学院, 北京 100083

* 通信作者, fengcuiyang@cumtb.edu.cn

收稿日期: 2024-03-04; 修回日期: 2024-10-08

国家自然科学基金项目(52300241)、中国矿业大学(北京)大学生创新训练项目(202305030)、中央高校基本科研业务费专项资金联合资助

摘要 石油是关系到国家安全的重要战略资源, 但现阶段其开发利用受到了水资源的约束。已有研究通过水足迹和虚拟水等指标对石油开发利用的水资源使用情况进行了测算, 但不能全面地反映其面临的水资源脆弱性。本研究基于投入产出分析方法, 考虑区域水资源压力, 构建了稀缺水足迹评估模型和虚拟稀缺水贸易测算模型, 从石油开发利用对稀缺水资源的消耗和对虚拟稀缺水贸易的驱动两个角度进行了综合评价。结果表明, 将区域水资源压力纳入水资源使用评估, 可以更好地反映中国区域石油开发利用面临的水资源约束。对于宁夏回族自治区等区域, 虽然在石油开发利用中使用的水资源量不多, 但却面临着严重的水资源稀缺性问题, 尤其是石油、炼焦产品和核燃料加工品面临着较大的水资源短缺压力。为了有效缓解上述区域在石油开发利用中面临的水资源脆弱性, 有必要从区域和部门层面对关键虚拟稀缺水流动进行识别和管理。从区域层面结果来看, 需要重点关注新疆维吾尔自治区、黑龙江省等虚拟稀缺水净流出区域对浙江省、辽宁省等虚拟稀缺水净流入区域在石油开发利用中的虚拟稀缺水转移。从部门层面结果来看, 需要重点关注能源类行业和农业对石油、炼焦产品和核燃料加工品的虚拟稀缺水的转移。为了有效缓解石油开发利用中面临的水资源压力, 本研究呼吁构建高效协同的水资源管理机制, 将水资源稀缺性作为核心考量因素纳入区域石油开发利用战略规划中。同时, 加强能源部门与水资源管理部门的跨部门合作, 科学规划开采布局与规模, 确保石油开发活动不损害水资源安全。此外, 通过虚拟稀缺水的区域调配、推广节水和水资源循环利用工艺技术等方式, 推动中国石油资源的可持续开发利用。

关键词 石油; 投入产出分析; 稀缺性; 水足迹; 虚拟水

中图分类号: X24

Water scarcity assessment for oil development and utilization

FENG Cuiyang, ZHAO Jialong, YIN Linlin

School of Management, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China

Received: 2024-03-04; Revised: 2024-10-08

Abstract Oil is an important strategic resource for national security, but its development and utilization are restricted by water resources at present. Some studies have measured the water resource use of oil development and utilization through water footprint and virtual water, but they cannot fully reflect the water resource vulnerability of oil development and utilization. Based on the input-output analysis method and water resources pressure, this study develops the scarce water footprint assessment model

引用格式: 冯翠洋, 赵佳龙, 尹琳琳. 石油开发利用的水资源稀缺性评价研究. 石油科学通报, 2024, 09(05): 841-852

FENG Cuiyang, ZHAO Jialong, YIN Linlin. Water scarcity assessment for oil development and utilization. Petroleum Science Bulletin, 2024, 09(05): 841-852. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.05.065

and virtual scarce water trade estimation model. These models are used to analyze the consumption of scarce water resources and the driving of virtual scarce water trade by regional oil development and utilization in China. The results show that incorporating regional water resources pressure into water use assessment can better reflect the water resources constraints of China's regional oil development and utilization. For Ningxia Hui Autonomous Region, the amount of water resources used in oil development and utilization is not large, but it faces serious water scarcity problems on account of water pressure. Especially, oil, coking products, and nuclear fuel processing products of Ningxia Hui Autonomous Region are faced with greater pressure of water shortage. To effectively mitigate the water resource vulnerability faced by the above regions in oil development and utilization, it is necessary to identify and manage critical virtual scarce water flows at the regional and sectoral levels. From the results at the regional level, it is necessary to focus on the transfer of virtual scarce water from net outflow areas of virtual scarce water such as Xinjiang Uygur Autonomous Region and Heilongjiang Province to net inflow areas of virtual scarce water such as Zhejiang Province and Liaoning Province in oil development and utilization. From the sector-level results, there is a need to focus on the diversion of virtual scarce water from the energy sector and agriculture to oil, coking, and nuclear fuel processing products. To effectively alleviate the pressure of water resources in oil development and utilization, this study calls for the establishment of an efficient and collaborative water resources management mechanism, and the inclusion of water scarcity as a core consideration in regional oil development and utilization strategic planning. At the same time, strengthen the cross-sectoral cooperation between the energy sector and the water resources management sector, scientifically plan the layout and scale of exploitation, and ensure that oil development activities do not harm water resources security. In addition, the sustainable development and utilization of China's oil resources are promoted through regional allocation of virtual scarce water, the promotion of water-saving and recycling technology of water resources.

Keywords oil; input-output analysis; scarcity; water footprint; virtual water

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.05.065

0 引言

石油作为不可再生资源,在经济发展和社会稳定中发挥着举足轻重的作用,是关系到国家安全的重要战略性矿产^[1]。2022年,国家发展改革委、国家能源局印发的《“十四五”现代能源体系规划》提出,要实施增强石油供应能力的战略安全保障措施,实现石油产量稳中有升^[2]。然而,石油是水需求非常集中和强烈的能源类型,水资源消耗贯穿石油勘探、开发建设、开采生产、石油化工的整个过程^[3]。特别是水力压裂技术的应用,使石油开发利用面临着短时间消耗大量水资源的问题^[4]。随着石油产量的提高、井数的增加,石油开发利用对水资源的依赖性不断增强^[5]。水资源已经成为制约石油开发利用的重要因素。

中国石油资源与水资源逆向分布,石油资源富集区与水资源匮乏区域高度重合,水资源问题已经成为制约石油可持续开发利用的关键^[6]。近年来,中国鄂尔多斯盆地、塔里木盆地、准格尔盆地和四川盆地等西部地区石油储量快速增长,2022年已探明储量17.79亿t,约占全国总量的46.73%^[7]。同时,该地区也是中国水资源最为匮乏的区域,水资源量为5117.4亿m³,仅约占全国总量的18.89%^[8]。加之气候变化带来的不确定性,使水资源短缺问题对石油开发利用的影响日益突出。因此,在石油开发利用过程中,要将水资源安全保障放到突出位置。

为了更好地管理石油开发利用中的水资源,已有研究利用生命周期评价方法对石油开发利用各个环节的直接水资源消耗进行了分析,识别了影响水资源消耗的关键环节^[9]。然而,石油开发利用过程中不仅直接消耗水资源,而且会通过物质材料投入间接消耗水资源^[10]。一些研究运用投入产出方法构建了石油开发利用的水足迹分析模型,对石油开发利用过程中的全部水资源需求进行了核算,为石油开发利用过程中的水资源管理提供了依据^[11]。为了更好地制定国家层面的水资源政策,部分研究对中国区域石油贸易中的虚拟水进行了测算,提出了将水资源管理纳入石油产业规划的建议^[12]。

由于中国水资源分布严重不均,水足迹或虚拟水量只能评估生产活动对水资源的使用情况,不能够全面地反映其面临的水资源压力^[13]。在水资源稀缺程度不同的区域,相同的水资源使用量可能会使石油开发利用面临不同的脆弱性^[14]。已有研究针对中国能源需求驱动的区域间稀缺水流动进行了分析,研究结果为区域层面水资源管理提供了参考^[15]。然而,针对石油开发利用的水资源稀缺性影响还较少。将水资源压力纳入水资源评价,构建石油开发利用的水资源稀缺性评价指标,可以更好地反映中国区域石油开发利用面临的水资源约束,为实现石油可持续开发利用提供决策支持。

1 模型方法与数据来源

本研究以中国区域石油开发利用为研究对象，对其稀缺水足迹及虚拟稀缺水进行测算，从而更好地反映中国区域石油开发利用面临的水资源约束。需要说明的是，这里的“石油开发利用”关注的是宏观层面上的石油开发利用行业，涉及国民经济行业分类中的“石油和天然气开采业”和“石油、煤炭及其他燃料加工业”两个行业。具体而言，本研究以投入产出分析模型(模型一)为基础，分别构建稀缺水足迹评估模型(模型二)和虚拟稀缺水贸易测算模型(模型三)两个模型，从石油开发利用对稀缺水资源的消耗和对虚拟稀缺水贸易的驱动进行综合分析。其中，稀缺水足迹评估模型是在传统水足迹评估模型基础上，考虑稀缺性指标，对稀缺水足迹进行分析；虚拟稀缺水贸易测算模型则是在传统虚拟水评估模型基础上，考虑稀缺性指标，对虚拟稀缺水进行分析。本研究的分析框架图如图1所示。

1.1 投入产出模型

投入产出分析是由Leontief于1936年首次提出^[16]，用于分析一个系统中各部门在产品生产和消耗之间的数量依存关系，现广泛应用于经济^[17]、能源^[18-19]、环境^[20]等问题的研究中。投入产出模型的基本公式如下：

$$X = AX + Y = (I - A)^{-1} Y \quad (1)$$

其中， $1 \times n$ 的列向量 X 表示总产出； $1 \times n$ 的列向量 Y 表示最终需求； $n \times n$ 的矩阵 A 是直接消耗系数，其元素 a_{ij}^{rs} ($A = [a_{ij}^{rs}]$)表示地区 s 部门 j 生产单位产品对地区 r 部门 i 的直接消耗量，其计算方法如公式(2)所示； $n \times n$ 的矩阵 $(I - A)^{-1}$ 是列昂惕夫逆矩阵，其元素 b_{ij}^{rs}

($(I - A)^{-1} = [b_{ij}^{rs}]$)表示地区 s 部门 j 生产单位最终产品对地区 r 部门 i 的消耗总量。

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

其中，元素 z_{ij}^{rs} 表示地区 s 部门 j 对地区 r 部门 i 的直接消耗量；元素 x_j^s 表示地区 s 部门 j 的总产出。

1.2 稀缺水足迹评估模型

水足迹是由Hoekstra于2002年首次提出，用于衡量某地区在一定时间内消费产品或服务中的水资源量^[21]。水足迹的计算公式如下：

$$Q = W (I - A)^{-1} Y \quad (3)$$

其中， $1 \times n$ 的列向量 Q 表示各部门的水足迹； $1 \times n$ 的列向量 W 是直接用水系数，其元素 w_j^s 表示地区 s 部门 j 生产单位产品的用水量，其计算方法如公式(4)所示。

$$w_j^s = \frac{v_j^s}{x_j^s} \quad (4)$$

其中，元素 v_j^s 表示地区 s 部门 j 的用水量。

具体而言，水足迹可以分为内部水足迹和外部水足迹。其中，内部水足迹是指某地区消费产品或服务中的水资源是由本地水资源提供；外部水足迹是指某地区消费产品或服务中的水资源是由外地水资源提供。内部水足迹和外部水足迹的计算公式，可以分别表示为：

$$IQ^s = W^s \left((I - A)^{-1} \right)^{ss} Y^{ss} \quad (5)$$

$$EQ^s = \sum_{r \neq s} W^r \left((I - A)^{-1} \right)^{rs} Y^{rs} \quad (6)$$

其中，变量 IQ^s 表示地区 s 的内部水足迹；列向量 W^s 表示地区 s 的直接用水系数；矩阵 $\left((I - A)^{-1} \right)^{ss}$ 表示

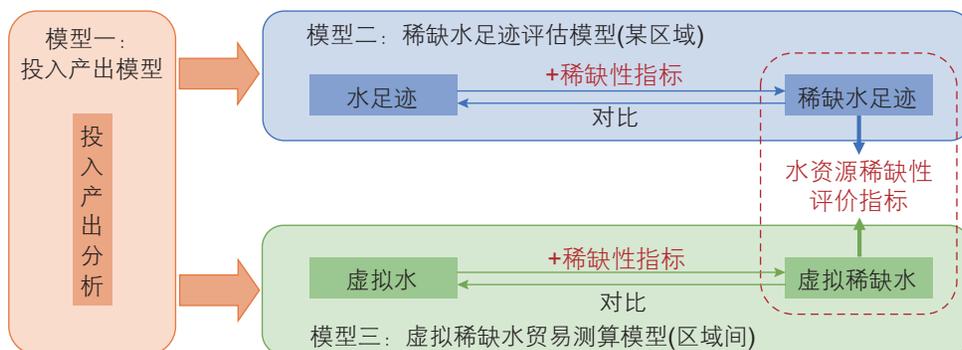


图1 本研究的分析框架图
Fig. 1 The analysis frame diagram of this study

地区 s 的列昂惕夫逆矩阵；列向量 Y^{ss} 表示地区 s 由本地产品满足的最终需求；变量 EQ^s 表示地区 s 的外部水足迹；列向量 W^r 表示地区 r 的直接用水系数；矩阵 $\left((I-A)^{-1}\right)^{rr}$ 表示地区 r 的列昂惕夫逆矩阵；列向量 Y^{rs} 表示地区 s 由地区 r 产品满足的最终需求。

稀缺水足迹是在水足迹概念的基础上，考虑水资源稀缺性对本地用水的影响。稀缺水足迹可以被定义为在某些商品或服务的整个生命周期生产过程中消耗的稀缺水资源量，即某些商品或服务在整个生命周期生产过程中对水资源短缺的贡献。由于在水资源稀缺程度不同的区域，相同的水消耗量可能会对当地水资源产生不同影响，因此通过对水足迹计算过程进行加权处理得到稀缺水足迹，可以使不同地区的产品或服务能够根据其在水资源短缺的贡献进行对比。稀缺水足迹的计算公式如下：

$$SQ = SW(I-A)^{-1}Y \quad (7)$$

其中， $1 \times n$ 的列向量 SQ 表示各部门的稀缺水足迹； $1 \times n$ 的列向量 SW 是直接稀缺用水系数，其元素 sw_j^s 表示地区 s 部门 j 生产单位产品的稀缺水用量，其计算方法如公式 (8) 所示。

$$sw_j^s = WSI^s \times \frac{v_j^s}{x_j^s} = \frac{v^s}{r^s} \times \frac{v_j^s}{x_j^s} \quad (8)$$

其中，元素 WSI^s 表示地区 s 的水压力指数，即从当地可用水源中取水而产生的水压力，可以通过当地农业、工业和家庭的用水量与当地可用性淡水资源量的比值计算得到；元素 v^s 表示地区 s 的水资源取用量；元素 r^s 表示地区 s 的水资源量。

内部稀缺水足迹和外部稀缺水足迹的计算公式，可以分别表示为：

$$ISQ^s = SW^s \left((I-A)^{-1} \right)^{ss} Y^{ss} \quad (9)$$

$$ESQ^s = \sum_{r \neq s} SW^r \left((I-A)^{-1} \right)^{rr} Y^{rs} \quad (10)$$

其中，变量 ISQ^s 表示地区 s 的内部稀缺水足迹；列向量 SW^s 表示地区 s 的直接稀缺用水系数；变量 ESQ^s 表示地区 s 的外部稀缺水足迹；列向量 SW^r 表示地区 r 的直接稀缺用水系数。

1.3 虚拟稀缺水贸易测算模型

虚拟水是由 Allan 于 1993 年首次提出^[22]，用于描述隐含在产品或服务生产过程中的用水量。虚拟水贸易是指通过产品或服务引起的区域间的虚拟水流动，其计算公式如下：

$$VWF = \hat{W}(I-A)^{-1}\hat{Y} \quad (11)$$

其中， $n \times n$ 的矩阵 VWF 是虚拟水贸易矩阵，其元素 VWF_{ij}^{rs} 表示地区 s 部门 j 生产最终产品对地区 r 部门 i 的虚拟水用量。

虚拟稀缺水是在虚拟水概念的基础上，考虑水资源稀缺性对水资源贸易的影响。虚拟稀缺水的计算公式如下：

$$SVWF = \widehat{SW}(I-A)^{-1}\hat{Y} \quad (12)$$

其中， $n \times n$ 的矩阵 $SVWF$ 是虚拟稀缺水贸易矩阵，其元素 $SVWF_{ij}^{rs}$ 表示地区 s 部门 j 生产最终产品对地区 r 部门 i 的虚拟稀缺水用量。

1.4 数据来源

本研究主要涉及两部分数据：投入产出表、水资源数据。投入产出表采用中国碳核算数据库 (Carbon Emission Accounts & Datasets) 编制的 2017 中国多区域投入产出表^[23]。该表是目前可以获取的最新年份中国多区域投入产出表，共涵盖中国 31 个区域，42 个经济部门。

水资源数据包含两类：用水量和水资源量。用水量数据采用《中国统计年鉴-2018》中的“供水用水情况”数据^[24]，并根据《中国经济普查年鉴-2008》中“水消费情况”^[25]，假定水资源消费结构不变，对分地区分行业用水情况进行调整^[25-26]。水资源量数据采用《中国统计年鉴-2018》中的“水资源情况”数据^[24]。

2 结果与讨论

2.1 中国区域石油开发利用的稀缺水足迹

2017 年中国石油开发利用的稀缺水足迹为 7.08 亿 m^3 ，各区域石油开发利用的稀缺水足迹如图 2 所示。其中，上海市石油开发利用的稀缺水足迹最高 (1.49 亿 m^3)，约占中国石油开发利用的稀缺水足迹的 20.97%。其次是宁夏回族自治区 (0.89 亿 m^3)、辽宁省 (0.64 亿 m^3)、江苏省 (0.56 亿 m^3)，分别约占中国石油开发利用的稀缺水足迹的 12.53%、9%、7.89%。石油开发利用的稀缺水足迹主要集中在少数关键地区，上述四个省市累计石油开发利用的稀缺水足迹占中国石油开发利用的稀缺水足迹的 50% 以上。

与石油开发利用的水足迹相比，石油开发利用的稀缺水足迹将区域资源禀赋纳入分析中，可以更加全面的反映区域石油开发利用面临的水资源脆弱性。例如，宁

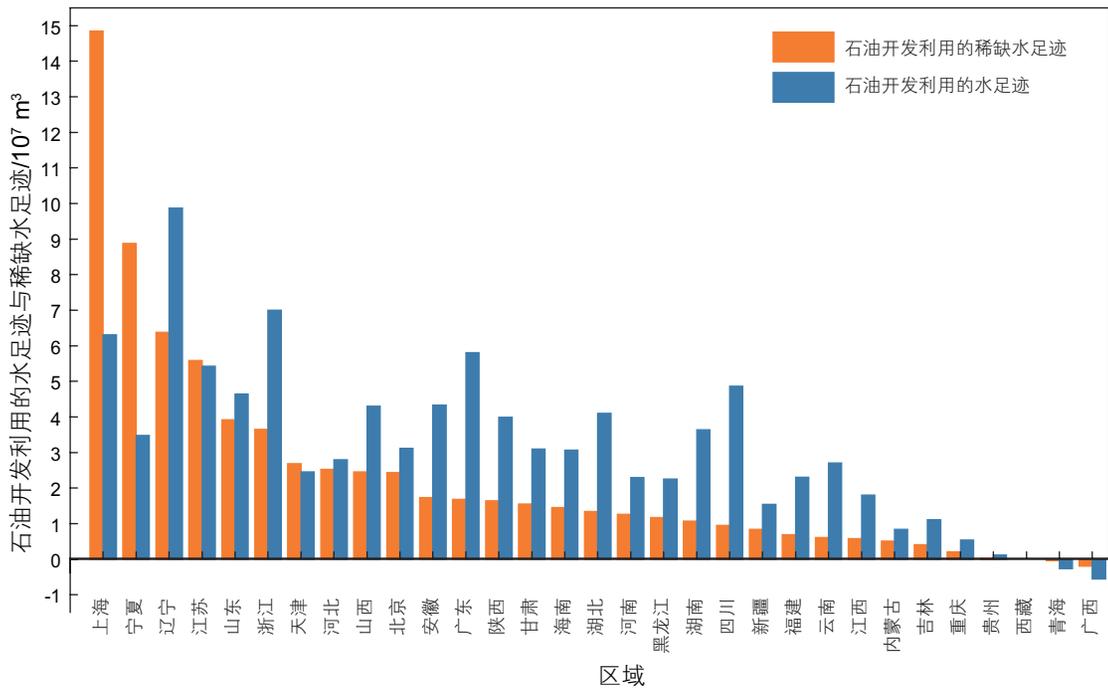


图 2 中国区域石油开发利用的稀缺水足迹和水足迹

Fig. 2 Water scarcity footprint and water footprint of regional oil development and utilization in China

宁夏回族自治区石油开发利用的水足迹为 0.35 亿 m³，在中国区域石油开发利用的水足迹排名中仅排第 13 位。然而，考虑到宁夏回族自治区面临的水资源压力，从石油开发利用的稀缺水足迹的角度看，其在中国区域石油开发利用的稀缺水足迹排名中排第 2 位。这说明虽然宁夏回族自治区石油开发利用对水资源的使用量不高，但由于宁夏回族自治区的水资源压力相对较大，所以其石油开发利用对当地水资源的影响较大。

与此相比，广东省的石油开发利用的水足迹为 0.58 亿 m³，在中国区域石油开发利用的水足迹排名中排第 4 位。然而，考虑到广东省的水资源压力，从石油开发利用的稀缺水足迹的角度看，其在中国区域石油开发利用的稀缺水足迹排名中仅排第 12 位。这说明广东省石油开发利用对水资源的使用量虽然较大，但由于广东省的水资源压力相对较小，所以其石油开发利用对当地水资源的影响较小。

从石油部门的角度看，本研究中石油开发利用的稀缺水足迹包含两部分内容：石油和天然气开采产品的稀缺水足迹，以及石油、炼焦产品和核燃料加工品的稀缺水足迹(图 3)。对于石油和天然气开采产品的稀缺水足迹，辽宁省是主要来源(0.19 亿 m³)，约占中国石油和天然气开采产品的稀缺水足迹总量的 69.18%。其次是黑龙江省(0.02 亿 m³)、新疆维吾尔自治区(0.02 亿 m³)、山东省(0.01 亿 m³)，分别约占中国

石油和天然气开采产品的稀缺水足迹总量的 8.63%、7.43%、4.29%。与石油和天然气开采产品的水足迹测算结果相比，石油和天然气开采产品的稀缺水足迹的测算结果在区域排名和占全国总量的比例上与其相似。

对于石油、炼焦产品和核燃料加工品的稀缺水足迹，上海市是主要来源(1.49 亿 m³)，约占中国石油、炼焦产品和核燃料加工品的稀缺水足迹总量的 21.84%。其次是宁夏回族自治区(0.89 亿 m³)、江苏省(0.56 亿 m³)、辽宁省(0.44 亿 m³)，分别约占中国石油、炼焦产品和核燃料加工品的稀缺水足迹总量的 13.05%、8.22%、6.51%。与石油、炼焦产品和核燃料加工品的水足迹测算结果相比，石油、炼焦产品和核燃料加工品的稀缺水足迹的测算结果在区域排名和占全国总量的比例上均有较大差别。

由上述分析可知，不同部门石油开发利用的稀缺水足迹区域构成有很大区别，但均集中在少数重点区域中。与石油开发利用的水足迹测算结果进行比较，可以发现考虑区域水压力指标对石油、炼焦产品和核燃料加工品的水足迹测算结果影响更大。因此，在研究中有必要对石油部门进行区分，并根据部门实际情况制定有针对性的水资源管理策略。同时，对重点区域石油开发利用的水资源进行管理，在缓解石油开发利用面临的水资源压力方面将会取得更大成效。

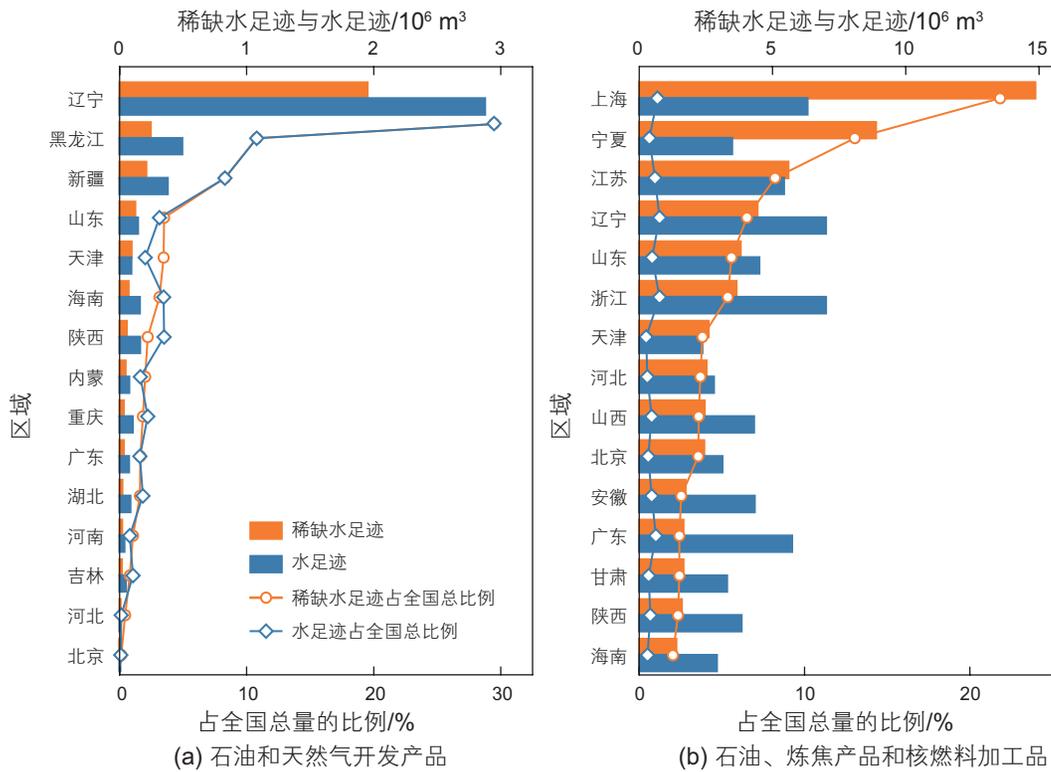


图3 中国主要区域不同部门石油开发利用的稀缺水足迹与水足迹

Fig. 3 Water scarcity footprint and water footprint of different sectors of oil development and utilization in major regions of China

2.2 中国区域石油开发利用对虚拟稀缺水流动的影响分析

石油开发利用需要大量水资源, 由于中国石油资源与水资源在空间分布上有明显的不均衡性, 因此石油开发利用会造成虚拟稀缺水的跨区域调动。2017年中国区域石油开发利用驱动的虚拟稀缺水净流出区域有14个, 净流入区域有17个(图4)。与中国各区域石油开发利用驱动的虚拟水结果相比, 虚拟稀缺水通过引入本地水压力指数, 使部分区域净流入和流出情况发生变化。其中, 宁夏回族自治区、上海市、江苏省、河北省四个本地水压力指数较大的地区, 由净流入区域变为了净流出区域。重庆市、江西省、陕西省、广东省、安徽省、山西省六个本地水压力指数较小的区域, 由净流入区域变为了净流出区域。

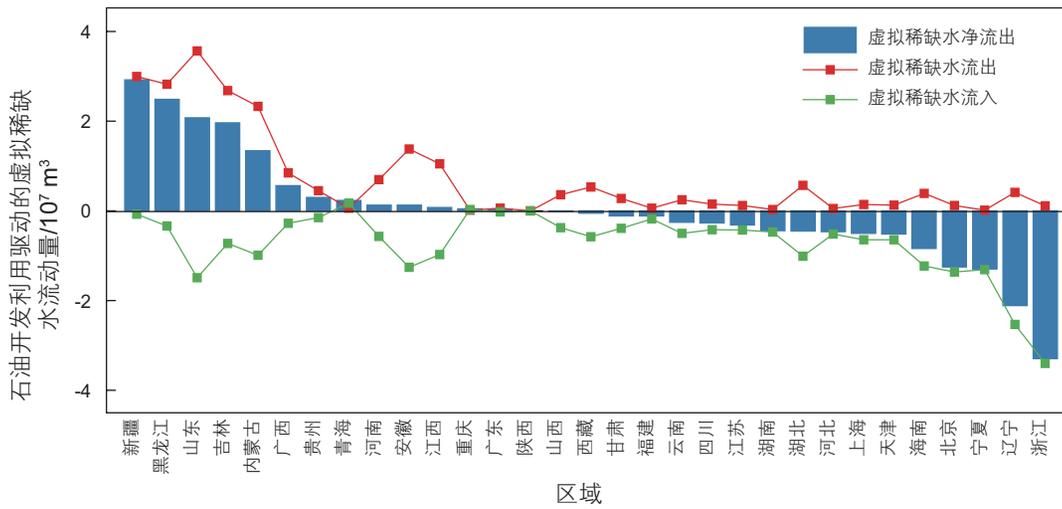
从石油开发利用驱动的虚拟稀缺水净流出区域来看, 大部分区域处在中国水资源相对贫瘠的北部地区。其中, 新疆维吾尔自治区石油开发利用驱动的虚拟稀缺水净流出量最大, 为0.19亿m³。然而, 新疆维吾尔自治区地处中国西北内陆干旱半干旱地区, 水资源较为短缺, 但仍通过石油贸易向其他区域流出大量虚拟稀缺水(0.3亿m³), 流入虚拟稀缺水量仅为0.01亿m³。

通过石油贸易, 中国北方水资源短缺地区虚拟稀缺水大量流出, 本地水资源安全面临严峻挑战。

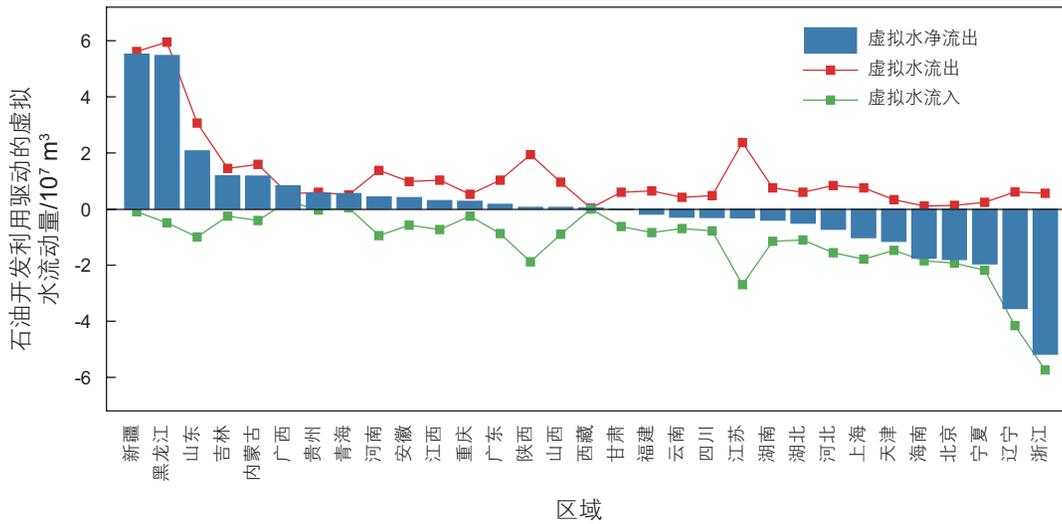
从石油开发利用驱动的虚拟稀缺水净流入区域来看, 大部分区域处在中国水资源相对丰富的南部地区。其中, 浙江省石油开发利用驱动的虚拟稀缺水净流入量最大, 为0.33亿m³。然而, 浙江省地处长江中下游, 水资源较为丰富, 水压力指数相对较小, 但仍通过石油贸易从其他区域流入大量虚拟稀缺水(0.34亿m³), 流入虚拟稀缺水量仅为0.01亿m³。从整体来看, 为了满足地区经济发展需求, 虚拟稀缺水通过石油贸易更多地流向了南方水资源丰富的地区。

由上述分析可知, 石油开发利用驱动的虚拟稀缺水不仅可以由本地水资源满足, 而且可以从其他区域流入。2017年中国各区域石油开发利用驱动的外部稀缺水足迹为2.26亿m³(图5), 约占总量的31.96%。其中, 浙江省和海南省石油开发利用驱动的外部稀缺水足迹分别为0.34亿m³、0.13亿m³, 约占本省稀缺水足迹总量的比例分别高达93.27%、90.22%。这表明部分区域对石油开发利用所使用的稀缺水资源, 主要依赖其他区域支持, 而非来源于本地水资源。

具体而言, 为了满足浙江省的石油开发利用, 山东省、黑龙江省和江苏省贡献了大量的虚拟稀缺水,



(a) 石油开发利用驱动的虚拟稀缺水流动



(b) 石油开发利用驱动的虚拟水流动

图 4 中国各区域石油开发利用驱动的虚拟稀缺水和虚拟水流入流出情况

Fig. 4 Inflows and outflows of virtual scarce water and virtual water driven by oil development and utilization in each region of China

分别为 0.09 亿 m^3 、0.07 亿 m^3 和 0.03 亿 m^3 ，3 个区域累计虚拟稀缺水流入量约占浙江省外部稀缺水足迹的 55.93%。这三部分虚拟稀缺水流不仅对满足浙江省石油开发利用很重要，而且在中国区域石油开发利用驱动虚拟稀缺水流中分别排名第一、第二和第九。此外，对于外部稀缺水足迹排名第二的辽宁省，其石油开发利用驱动的虚拟稀缺水主要由黑龙江、江苏和新疆维吾尔自治区流入，流入量分别为 0.06 亿 m^3 、0.04 亿 m^3 和 0.03 亿 m^3 。3 个区域累计虚拟稀缺水流入量约占辽宁省外部稀缺水足迹的 53.07%，在中国区域石油开发利用驱动虚拟稀缺水流中分别排名第三、第五和第七。

对比不考虑区域水压力的虚拟水而言，中国各区域外部水足迹排名变化不大，浙江省和辽宁省石油开发利用驱动的外部水足迹仍然位列中国前两位，分别

为 0.57 亿 m^3 、0.42 亿 m^3 。然而，具体分析各区域石油开发利用驱动的虚拟水流情况有一定区别。对于浙江省的石油开发利用而言，黑龙江省、山东省和陕西省是主要虚拟水的来源，分别为 0.15 亿 m^3 、0.10 亿 m^3 和 0.06 亿 m^3 。3 个区域累计虚拟水流入量约占浙江省外部水足迹的 52.79%，在中国区域石油开发利用驱动虚拟水流中分别排名第一、第四和第六。对于辽宁省的石油开发利用而言，黑龙江省和新疆维吾尔自治区是主要的虚拟水来源，分别为 0.12 亿 m^3 、0.06 亿 m^3 。两个区域累计虚拟水流入量约占辽宁省外部水足迹的 44.11%，在中国区域石油开发利用驱动虚拟水流中分别排名第二、第五。由此可见，虚拟水和虚拟稀缺水的区域间流动结果具有一定差异，虚拟稀缺水的结果将本地水资源压力纳入分析中，可以更加有效地识别出缓解水资源压力的关键区域间流动。

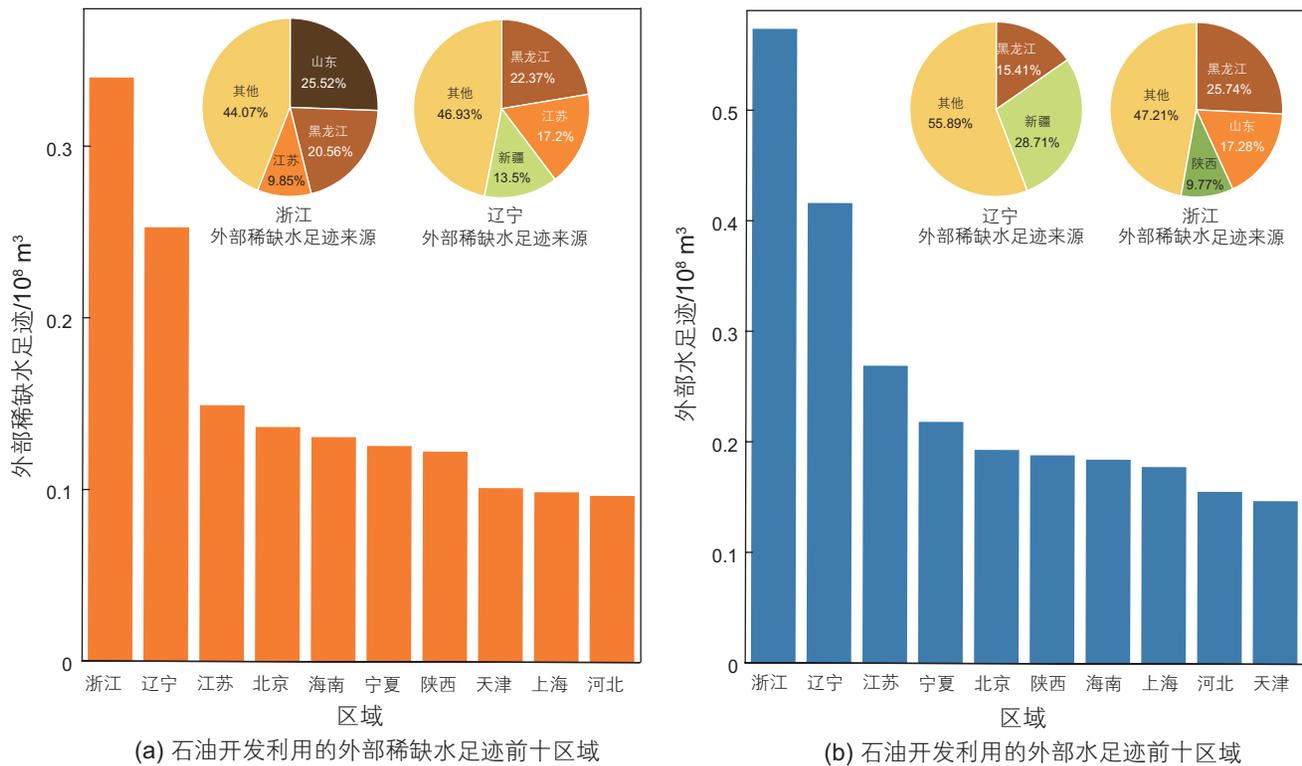


图5 中国石油开发利用的外部稀缺水足迹和外部水足迹前十区域情况

Fig. 5 Top ten regions in the external scarce water footprint and external water footprint of oil development and utilization in China

2.3 中国区域石油开发利用对部门虚拟稀缺水使用的影响分析

为了更好地管理石油开发利用过程中的水资源,进一步从部门层面对中国区域石油开发利用的虚拟稀缺水使用进行分析。中国石油开发利用对各区域部门虚拟稀缺水的使用情况,如图6所示。从部门来看,石油、炼焦产品和核燃料加工品为中国石油开发利用提供了大量的虚拟稀缺水(3.75 亿m³),约占中国石油开发利用使用虚拟稀缺水总量的46.39%。其次是电力、热力的生产和供应(1.28 亿m³),农林牧渔产品和服务(1.26 亿m³),石油和天然气开采产品(0.8 亿m³),煤炭采选产品(0.33 亿m³),上述五个部门累计虚拟稀缺水供应量约占中国石油开发利用使用虚拟稀缺水总量的91.76%。这说明中国石油开发利用使用的虚拟稀缺水主要集中在少数部门,上述能源类行业和农业应该予以重点关注。

从区域部门来看,上海市石油、炼焦产品和核燃料加工品提供的虚拟稀缺水最多(1.2 亿m³),约占中国石油开发利用使用虚拟稀缺水总量的14.88%。其次是江苏省电力、热力的生产和供应(0.37 亿m³),上海市电力、热力的生产和供应(0.35 亿m³),宁夏回族自治

区石油、炼焦产品和核燃料加工品(0.3 亿m³),宁夏回族自治区农林牧渔产品和服务(0.26 亿m³),上述5个部门累计虚拟稀缺水供应量约占中国石油开发利用使用虚拟稀缺水总量的30.61%。由此可见,上述区域部门在石油开发利用的虚拟稀缺水使用中起到了重要作用,是缓解水资源压力的关键。

与虚拟水的结果进行对比发现,从部门来看变化不大,石油、炼焦产品和核燃料加工品仍然对中国石油开发利用的虚拟水供应最多(4.08 亿m³),约占中国石油开发利用使用虚拟水总量的38.11%。其次是农林牧渔产品和服务(1.94 亿m³),电力、热力的生产和供应(1.58 亿m³),石油和天然气开采产品(1.51 亿m³),煤炭采选产品(0.46 亿m³),上述5个部门累计虚拟水供应量约占中国石油开发利用使用虚拟水总量的89.4%。然而,从区域部门来看结果有明显差异,中国石油开发利用驱动虚拟稀缺水和虚拟水排名前十的部门如表1所示。广东省石油、炼焦产品和核燃料加工品提供的虚拟水最多(0.49 亿m³),约占中国石油开发利用使用虚拟水总量的4.59%。其次是上海市石油、炼焦产品和核燃料加工品,新疆维吾尔自治区石油和天然气开采产品,黑龙江省石油和天然气开采产品,辽宁省石油和天然气开采产品,上述5个部门累计虚拟水供应

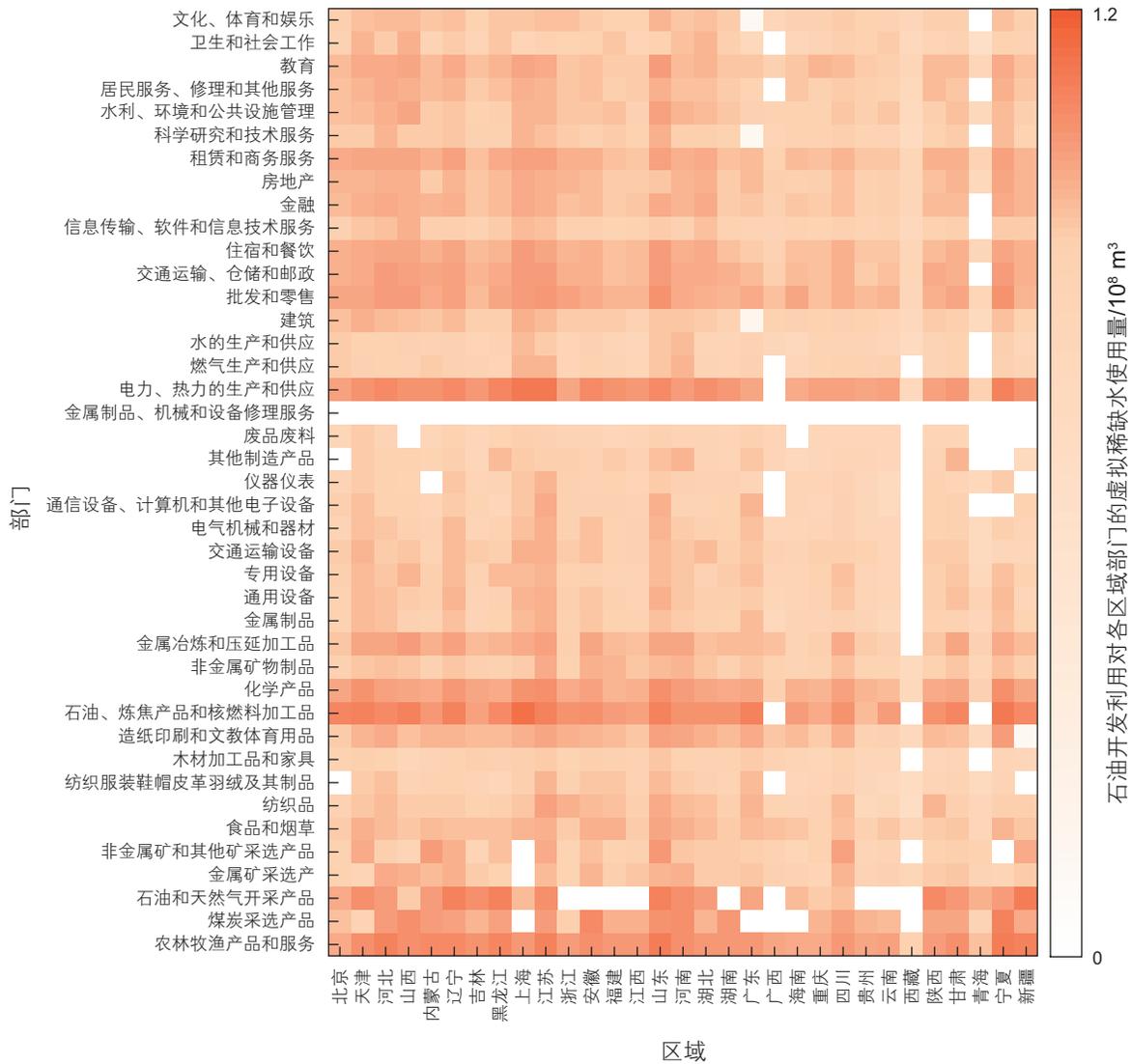


图 6 中国石油开发利用对各区域部门虚拟稀缺水的使用情况

Fig. 6 Virtual scarce water use of each sector driven by regional oil development and utilization in China

量约占中国石油开发利用使用虚拟水总量的 16.34%。相比之下，考虑本地水资源压力的虚拟稀缺水更加关注水资源压力大的区域部门，更有利识别出石油开发利用中影响水资源供应的重要环节。

在对中国石油开发利用的部门虚拟稀缺水使用情况分析的基础上，识别影响中国石油开发利用的关键虚拟稀缺水部门间流动，可以为制定缓解区域水资源压力的措施提供信息参考。在排除石油开发利用对本部门自身的虚拟稀缺水投入外，中国区域石油开发利用驱动的排名前十虚拟稀缺水流和虚拟水流如表 2 所示。对于虚拟稀缺水和虚拟水而言，中国石油开发利用的关键部门间流动均主要发生在本地，石油、炼焦产品和核燃料加工品是主要的流入部门，能源类行业和农业是主要流出部门。

对于虚拟稀缺水的关键部门间流动来说，江苏省电力、热力的生产和供应流入江苏省石油、炼焦产品和核燃料加工品的虚拟稀缺水流动量最多(0.19 亿 m^3)，其次是上海市电力、热力的生产和供应流入上海市石油、炼焦产品和核燃料加工品的虚拟稀缺水流动(0.19 亿 m^3)，宁夏回族自治区农林牧渔产品和服务流入宁夏回族自治区石油、炼焦产品和核燃料加工品的虚拟稀缺水流动(0.17 亿 m^3)。同时，一些关键部门间虚拟稀缺水流动也发生在区域间，例如新疆维吾尔自治区石油和天然气开采产品流入宁夏回族自治区石油、炼焦产品和核燃料加工品的虚拟稀缺水流动(0.04 亿 m^3)，山东省石油和天然气开采产品流入浙江省石油、炼焦产品和核燃料加工品的虚拟稀缺水流动(0.04 亿 m^3)。这两条关键部门间虚拟稀缺水流动在中国石油开发利用的

表1 中国石油开发利用驱动的虚拟稀缺水和虚拟水排名前十的区域部门

Table 1 Top ten regional sectors in virtual scarce water use and virtual water use driven by oil development and utilization in China

排名	中国石油开发利用驱动的虚拟稀缺水				中国石油开发利用驱动的虚拟水			
	区域	部门	水量/ 亿m ³	比例/ %	区域	部门	水量/ 亿m ³	比例/ %
1	上海	石油、炼焦产品和核燃料加工品	1.20	14.88	广东	石油、炼焦产品和核燃料加工品	0.49	4.59
2	江苏	电力、热力的生产和供应	0.37	4.52	上海	石油、炼焦产品和核燃料加工品	0.39	3.68
3	上海	电力、热力的生产和供应	0.35	4.30	新疆	石油和天然气开采产品	0.33	3.08
4	宁夏	石油、炼焦产品和核燃料加工品	0.30	3.71	黑龙江	石油和天然气开采产品	0.28	2.60
5	宁夏	农林牧渔产品和服务	0.26	3.20	辽宁	石油和天然气开采产品	0.26	2.39
6	山东	农林牧渔产品和服务	0.18	2.26	江苏	电力、热力的生产和供应	0.24	2.27
7	新疆	石油和天然气开采产品	0.18	2.17	山西	石油、炼焦产品和核燃料加工品	0.24	2.23
8	辽宁	石油和天然气开采产品	0.17	2.13	新疆	农林牧渔产品和服务	0.22	2.03
9	宁夏	煤炭采选产品	0.15	1.86	黑龙江	农林牧渔产品和服务	0.22	2.02
10	江苏	农林牧渔产品和服务	0.14	1.79	山东	农林牧渔产品和服务	0.21	1.95

表2 中国区域石油开发利用驱动的排名前十虚拟稀缺水流和虚拟水流

Table 2 Top ten virtual scarce water flows and virtual scarce water flows driven by regional oil development and utilization in China

排名	中国区域石油开发利用的虚拟稀缺水流			中国区域石油开发利用的虚拟水流		
	流出	流入	水量/ 亿m ³	流出	流入	水量/ 亿m ³
1	江苏-电力、热力的生产和供应	江苏-石油、炼焦产品和核燃料加工品	0.19	江苏-电力、热力的生产和供应	江苏-石油、炼焦产品和核燃料加工品	0.13
2	上海-电力、热力的生产和供应	上海-石油、炼焦产品和核燃料加工品	0.19	安徽-煤炭采选产品	安徽-石油、炼焦产品和核燃料加工品	0.12
3	宁夏-农林牧渔产品和服务	宁夏-石油、炼焦产品和核燃料加工品	0.17	湖北-电力、热力的生产和供应	湖北-石油、炼焦产品和核燃料加工品	0.11
4	宁夏-煤炭采选产品	宁夏-石油、炼焦产品和核燃料加工品	0.13	山东-农林牧渔产品和服务	山东-石油、炼焦产品和核燃料加工品	0.10
5	宁夏-电力、热力的生产和供应	宁夏-石油、炼焦产品和核燃料加工品	0.09	安徽-电力、热力的生产和供应	安徽-石油、炼焦产品和核燃料加工品	0.10
6	山东-农林牧渔产品和服务	山东-石油、炼焦产品和核燃料加工品	0.09	黑龙江-石油和天然气开采产品	浙江-石油、炼焦产品和核燃料加工品	0.09
7	辽宁-石油和天然气开采产品	辽宁-石油、炼焦产品和核燃料加工品	0.06	辽宁-石油和天然气开采产品	辽宁-石油、炼焦产品和核燃料加工品	0.08
8	安徽-煤炭采选产品	安徽-石油、炼焦产品和核燃料加工品	0.04	新疆-石油和天然气开采产品	宁夏-石油、炼焦产品和核燃料加工品	0.08
9	新疆-石油和天然气开采产品	宁夏-石油、炼焦产品和核燃料加工品	0.04	四川-农林牧渔产品和服务	四川-石油、炼焦产品和核燃料加工品	0.07
10	山东-石油和天然气开采产品	浙江-石油、炼焦产品和核燃料加工品	0.04	陕西-石油和天然气开采产品	陕西-石油、炼焦产品和核燃料加工品	0.07

关键部门间虚拟稀缺水流动中，分别排第九、第十位。

对于虚拟水的关键部门间流动来说，江苏省电力、热力的生产和供应流入江苏省石油、炼焦产品和核燃料加工品的虚拟水流动量最多(0.13 亿m³)，其次是安

徽省煤炭采选产品流入安徽省石油、炼焦产品和核燃料加工品的虚拟水流动(0.12 亿m³)，湖北省电力、热力的生产和供应流入湖北省石油、炼焦产品和核燃料加工品的虚拟水流动(0.11 亿m³)。与虚拟稀缺水类似，

关键部门间虚拟水流动也发生在区域间,例如黑龙江省农林牧渔产品和服务流入浙江省石油、炼焦产品和核燃料加工品的虚拟水流动(0.09 亿 m^3),新疆维吾尔自治区石油和天然气开采产品流入宁夏回族自治区石油、炼焦产品和核燃料加工品的虚拟水流动(0.08 亿 m^3)。这两条关键部门间虚拟水流动在中国石油开发利用的关键部门间虚拟水流动中,分别排第六、第八位。由此可见,虚拟稀缺水和虚拟水的关键部门间流动有一定区别,考虑区域水资源压力可以为制定部门层面的水资源管理措施提供决策参考。

3 结论与建议

中国水资源分布严重不均,不同区域石油开发利用面临着不同的水资源脆弱性。本研究基于投入产出分析方法,对中国区域石油开发利用的水资源稀缺性影响进行了评估。研究发现将区域水资源压力纳入水足迹评估,可以更好地反映中国区域石油开发利用面临的水资源约束。例如,宁夏回族自治区等区域虽然在石油开发利用中使用的水资源量不多,但却面临着严重的水资源稀缺性问题,尤其是石油、炼焦产品和核燃料加工品面临着较大的水资源短缺压力。为了有效缓解上述区域在石油开发利用中面临的水资源脆弱性,有必要从区域和部门层面对关键虚拟稀缺水流动进行识别和管理。从区域层面来看,需要重点关注新疆维吾尔自治区、黑龙江省等虚拟稀缺水净流出区域对浙江省、辽宁省等虚拟稀缺水净流入区域在石油开发利用中的虚拟稀缺水转移。从部门层面来看,需要重点关注能源类行业和农业对石油、炼焦产品和核燃

料加工品的虚拟稀缺水的转移。

因此,在中国石油开发利用过程中需要将水资源安全放在突出位置,并将水资源稀缺性作为重要指标纳入水资源管理。在国家层面,面对石油资源开发利用与水资源安全之间的紧密关联,我们亟需构建一套高效协同的管理机制,将水资源稀缺性作为核心考量因素深度融入区域石油开发利用战略规划之中。同时,能源部门与水资源管理部门应强化跨部门合作,共同评估各石油开采区域的水资源承载力,科学规划开采布局与规模,确保石油开发活动不以牺牲水资源安全为代价。在区域层面,针对不同区域间水资源分布不均的现实挑战,合理调配石油开发利用所需的物质投入成为缓解水资源压力的关键举措。具体而言,在宁夏回族自治区、上海市等高水资源压力区域应审慎评估其水资源承载力,减少水资源密集型活动的物质投入,转而依赖从低水压力区域进口的水密集型产品;在低水压力区域,可以适度扩大石油开发利用的物质投入比例,利用当地相对充裕的水资源条件,发展节水高效的石油开采技术,提高水资源利用效率。在部门层面,有必要将水资源安全纳入中国石油开发利用的全过程,确保能源开发与水资源保护的双赢局面。具体而言,在能源类和农业等关键虚拟稀缺水流出部门,大力推广节水和水资源循环利用工艺技术,提高其用水效率和水资源循环利用水平;对于石油、炼焦产品和核燃料加工品等关键虚拟稀缺水流入部门,注重水资源使用的合理配置,确保水资源高效利用并减少浪费。通过上述水资源管理措施,减少石油开发利用对稀缺水的使用,推动中国石油资源可持续的开发利用。

参考文献

- [1] 李期,郑明贵,曾健林.全球石油供应链演变趋势:基于实物和虚拟石油贸易比较[J].资源科学,2023,45(8):1497-1514.[LI Q, ZHENG M G, ZENG J L. Trend of global oil supply chain change: Comparison based on physical and virtual oil trade [J]. Resources Science, 2023, 45(8): 1497-1514.]
- [2] 国家发展改革委,国家能源局.“十四五”现代能源体系规划[EB/OL].[2022-03-22].https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220322_1320016.html. [National Development and Reform Commission, National Energy Administration. 14th Five-Year Plan for modern energy system [EB/OL]. [2022-03-22]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220322_1320016.html.]
- [3] 朱永楠,苏健,王建华,等.西部地区油气资源开发与水资源协同发展模式探索[J].中国工程科学,2021,23(3):129-134.[ZHU Y N, SU J, WANG J H, et al. Coordinated development mode of oil and gas resources and water resources in western China [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(3): 129-134.]
- [4] 董翼昕,倪云燕,张津川.页岩气开发潜在水环境风险与应对措施[J].天然气地球科学,2023,34(11):2021-2035.[DONG Y X, NI Y Y, ZHANG J C. Environmental risks of shale gas extraction and protection measures [J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(11): 2021-2035.]
- [5] ZHU Y, WANG J, HE G, et al. Water use characteristics and water footprints of China's oil and gas production [J]. Resources, Conser-

- vation & Recycling, 2022, 184: 106428.
- [6] JIN Y, TANG X, FENG C, et al. Energy and water conservation synergy in China: 2007–2012 [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2017, 127: 206–215.
- [7] 中华人民共和国自然资源部. 2022年全国矿产资源储量统计表 [R]. 北京, 2023. [Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Statistical table of national mineral resources reserves– 2022 [R]. Beijing, 2023.]
- [8] 国家统计局. 中国统计年鉴–2023 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2023. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook–2023 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.]
- [9] WANG S, TANG X, WANG J, et al. Environmental impacts from conventional and shale gas and oil development in China considering regional differences and well depth [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2021, 167: 105368.
- [10] 关伟, 赵湘宁, 许淑婷. 中国能源水足迹时空特征及其与水资源匹配关系 [J]. 资源科学, 2019, 41(11): 2008–2019. [GUAN W, ZHAO X N, XU S T. Spatiotemporal feature of the water footprint of energy and its relationship with water resources in China [J]. Resources Science, 2019, 41(11): 2008–2019.]
- [11] FENG C, TANG X, JIN Y, et al. The role of energy-water nexus in water conservation at regional levels in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 210: 298–308.
- [12] LIN L, CHEN D Y, HUA D, et al. Provincial virtual energy-water use and its flows within China: A multiregional input-output approach [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2019, 151: 104486.
- [13] LIU R, WANG J, LIN L. Water scarcity footprint assessment for China's shale gas development [J]. The Extractive Industries and Society, 2021, 8(2): 100892.
- [14] LIAO X, ZHAO X, LIU W, et al. Comparing water footprint and water scarcity footprint of energy demand in China's six megacities [J]. Applied Energy, 2020, 269: 115137.
- [15] LI H, LIANG Y, CHEN Q, et al. Pollution exacerbates interregional flows of virtual scarce water driven by energy demand in China [J]. Water Research, 2022, 223: 118980.
- [16] LEONTIEF W W. Quantitative input and output relations in the economic systems of the United States [J]. Review of Economics and Statistics, 1936, 18(3): 105–125.
- [17] WANG Z, MA D, TANG J. Asymmetric fiscal policies and digital economy development: An empirical analysis based on the global digital value chain perspective [J]. International Review of Financial Analysis, 2024, 96(Part A): 103556.
- [18] 冯翠洋, 唐旭, 金艺, 等. 中国隐含石油出口变动的产业间路径分解研究 [J]. 石油科学通报, 2017, 2(4): 546–556. [FENG C Y, TANG X, JIN Y, et al. Inter-industry path decomposition of embodied oil export changes in China [J]. Petroleum Science Bulletin, 2017, 2(04): 546–556.]
- [19] 罗鹏飞, 姜钰卿, 兰志轩, 等. 双循环视角下中国省区隐含能贸易及其对能耗双控的影响研究 [J]. 石油科学通报, 2023, 8(2): 234–246. [LUO P F, JIANG Y Q, LAN Z X, et al. Research into Chinese embodied energy trade and its impact on dual control of energy consumption under the perspective of dual circulation [J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(2): 234–246.]
- [20] 姜钰卿, 唐旭, 任凯鹏, 等. 基于双层嵌套SDA的中国减污降碳驱动因素研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(12): 3294–3304. [JIANG Y Q, TANG X, REN K P, et al. Research on the drivers of pollution and carbon reduction in China based on double-layer nested SDA [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2022, 42(12), 3294–3304.]
- [21] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade [R]. Delft, 2002.
- [22] ALLAN J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible [R]. London, 1993.
- [23] ZHENG H, ZHANG Z, WEI W, et al. Regional determinants of China's consumption-based emissions in the economic transition [J]. Environmental Research Letters, 2020, 15: 074001.
- [24] 国家统计局. 中国统计年鉴–2018 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2018. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook–2018 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2018.]
- [25] 国务院第二次全国经济普查领导小组办公室. 中国经济普查年鉴–2008 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2010. [Office of the Leading Group of the State Council for the Second National Economic Census. China Economic Census Yearbook–2008 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2010.]
- [26] ZHANG K, LU H, TIAN P, et al. Analysis of the relationship between water and energy in China based on a multi-regional input-output method [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 309: 114680.