

引用格式: 吴乐英, 赵义义, 苗长虹, 等. 黄河流域省际贸易隐含能源流动格局及其产业链路径[J]. 资源科学, 2024, 46(11): 2150–2162. [Wu L Y, Zhao Y Y, Miao C H, et al. Embedded energy flow and its industrial chain pathways in interprovincial trade within the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2024, 46(11): 2150–2162.] DOI: 10.18402/resci.2024.11.05

# 黄河流域省际贸易隐含能源流动格局及其产业链路径

吴乐英<sup>1,2,3</sup>, 赵义义<sup>1,2</sup>, 苗长虹<sup>1,2</sup>, 钟章奇<sup>4</sup>, 杜锦<sup>1,2,3</sup>

(1. 河南大学应对碳中和实验室, 郑州 450046; 2. 河南大学黄河文明与可持续发展研究中心暨黄河文明省部共建协同创新中心, 开封 475001; 3. 河南省城乡规划设计研究总院股份有限公司, 郑州 450044; 4. 广东外语外贸大学经济贸易学院, 广州 510006)

**摘要:**【目的】能源相关碳排放是气候变暖的主要原因,厘清黄河流域省际贸易隐含能源格局及关键部门的产业链路径,对于合理控制能源消耗总量,实现中国双碳目标和黄河流域高质量发展具有重要作用。【方法】基于2007—2017年中国30个省份区域间投入产出表数据,采用多区域投入产出模型和结构路径分析方法,探索黄河流域省际贸易隐含能源格局演变以及关键部门的产业链路径。【结果】①黄河流域整体为生产型能源区域,金属冶炼和压延加工品、石油及化学工业以及电力、热力、燃气及水的生产和供应是流域中能源消耗量最大的3个部门。②流域内省际贸易隐含能源格局总体上是高效的,从低能耗强度省份向高能耗强度省份延伸;而流域与区域外省份间的贸易隐含能源格局则相反。关键的区域外省际产业链路径主要服务于东南沿海省份以及直辖市的建筑部门和其他服务业的最终需求。③流域内87.7%的能耗集中在前5个生产层,前50条产业链路径转移了全部能源消耗的34.7%,且多是为了满足建筑业的最终需求。【结论】黄河流域可利用低能耗强度地区向高能耗强度地区的产业链减少能耗总量,以及在产业链关键节点省份间建立资本技术合作体系的有效措施来实现能耗总量的减少。

**关键词:** 隐含能源消耗; 产业链; 多区域投入产出; 结构路径分析; 黄河流域

DOI: 10.18402/resci.2024.11.05

## 1 引言

快速的工业化进程带来高能耗产业对能源的巨大需求,传统能源相关碳排放是气候变暖的主要原因。国际能源机构(IEA)认为,降低能源消耗总量对于全球减少碳排放量至关重要<sup>[1]</sup>。中国的能源消耗占全世界约1/4,且呈现持续增长的态势<sup>[2]</sup>,能源结构中传统能源高达82.71%,煤炭消耗占比达54.66%<sup>[3]</sup>,减排压力不容小觑。为实现“双碳”目标,中国必须采取有效措施来控制能源消耗总量。

已有研究关注到中国能源消耗的空间格局及

影响因素<sup>[4,5]</sup>。由于中国各地区资源禀赋和环境规制的差异<sup>[6]</sup>,经济发达地区将能源密集型产业转移到欠发达地区,以减少发达地区的能源消耗压力<sup>[7]</sup>。这一举措不利于欠发达地区进行能源结构调整,导致国家层面的能源消耗总量增加。实际上,欠发达地区生产的能源并非仅在本地使用,而是作为中间投入在全国生产网络中重新分配<sup>[8]</sup>。若不考虑产业链中贸易隐含能源的泄漏效应,将能源消耗责任归咎于欠发达地区,将导致能源消耗不平等现象发生<sup>[9]</sup>。在中国持续推进国内产业链开放合作的背景

收稿日期: 2024-05-31; 修订日期: 2024-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41901239); 国家社会科学基金一般项目(2022BGL196); 2025年度河南省高校人文社会科学研究一般项目(2025-ZZJH-152); 河南省青年人才托举工程项目(2022HYTP027)。

作者简介: 吴乐英,女,河南长葛人,博士,副教授,研究方向为区域可持续发展与政策模拟。E-mail: wuleying614@126.com

通讯作者: 赵义义,女,河北张家口人,硕士研究生,研究方向为区域可持续发展与政策模拟。E-mail: zhaoyiyi0401@163.com

2024年11月

下,有必要进一步厘清中国不同区域间贸易隐含能源格局的演变,以便更好地理解区域间贸易隐含能源的不平等,为实现“双碳”目标奠定基础。

多区域投入产出模型(Multi-Region Input-Output, MRIO)可以量化资源利用和环境排在跨区域生产者和消费者之间的转移和流动,广泛应用于贸易隐含能源消耗的研究。在国家层面,已有研究关注到全球范围的贸易隐含能源及可再生能源<sup>[10]</sup>、发达国家和发展中国家的贸易隐含能源<sup>[9]</sup>、中国对外贸易的隐含能源消耗<sup>[11]</sup>等。以上研究表明,随着全球产业链的不断深化,越来越多的发达国家选择将能源密集型产业外包给发展中国家,导致发达国家的能源消耗趋于平稳甚至下降,而发展中国家的能源消耗迅速增加。在产业层面,已有研究关注到中国高能耗行业的产业转移、中国建筑业的省际能源流动以及ICT产业的贸易隐含能源流动<sup>[12-14]</sup>。这些研究从国际贸易和产业角度阐释了隐含能源流动格局,有助于决策者实施更加高效准确的节能策略。仅有少量研究关注到中国直辖市的贸易隐含能源格局<sup>[15]</sup>,中国区域尺度贸易隐含能源格局演变的研究较为缺乏。

结构路径分析(Structural Path Analyzes, SPA)通过跟踪最终需求推动下中间产品的生产及使用,实现对生产系统各个层次的解析<sup>[16]</sup>,在能源足迹<sup>[17]</sup>、水足迹<sup>[18]</sup>、资源利用<sup>[19]</sup>、碳排放<sup>[20]</sup>、水-能-土地系统<sup>[21]</sup>以及水-能-粮系统<sup>[22]</sup>等领域应用广泛。以上研究结果表明产业链中间环节的贸易传输十分关键,因此,有必要对产业链的关键路径及节点进行梳理。考虑到中国能源消耗的复杂性及多样性,现有研究主要关注家庭能源消耗<sup>[23]</sup>、长江经济带的居民能源消耗<sup>[24]</sup>、唐山市能源消耗<sup>[25]</sup>以及建筑业能源消耗流动<sup>[26]</sup>产业链中的关键路径。

参考2021年国务院印发的《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》,本文研究区域为黄河流域的青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南和山东9个省级行政区,简称黄河流域。该研究区域总面积约359万km<sup>2</sup>,占全国的37.4%,经济总量占全国的25%,是中国重要的能源区域<sup>[27]</sup>,全流域煤炭、天然气和石油储量分别占全国的75%、37.2%和34%<sup>[28]</sup>,产业结构主要以原材料、能源化工和传统

农牧业为主,存在倚能倚重、低质低效的问题<sup>[29]</sup>。因此,如何通过优化产业链有效减少能源消耗,加快绿色低碳化转型对于黄河流域至关重要。当前针对黄河流域能源的相关研究主要集中于能源消耗碳排放时空格局演变<sup>[30,31]</sup>、能源碳足迹<sup>[32]</sup>、能源综合效率<sup>[33]</sup>、水-能-粮系统<sup>[34]</sup>、水-能-生态系统<sup>[35]</sup>以及经济-能-水耦合<sup>[36]</sup>等方面。这些研究为解决黄河流域能源问题提供了重要的参考依据,但仍存在一些问题有待解决:①黄河流域贸易隐含能源格局的演变过程;②黄河流域减少能源消耗的关键生产路径。

鉴于此,本文基于2007—2017年中国省级多区域投入产出表,利用多区域投入产出模型(MRIO),从产业链的角度分析黄河流域贸易隐含能源格局的演变及其关键部门产业链网络中的隐含能源消耗;通过结构路径分析(SPA)方法挖掘关键产业路径,为黄河流域减少能源消耗、加快绿色低碳转型提供科学合理的政策建议。

## 2 研究方法与数据来源

### 2.1 研究方法

#### 2.1.1 多区域投入产出(MRIO)

MRIO模型不仅可以反映不同部门之间的关系,还可以反映各省之间的生产联系,已广泛应用于经济贸易和环境问题的研究。其存在以下平衡关系:

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

式中: $X$ 为30个省份总产出列矩阵; $(I - A)^{-1}$ 为列昂惕夫逆矩阵; $I$ 为单位矩阵; $A$ 为中间投入系数矩阵; $Y$ 为省际最终消费矩阵,不包含出口。

将能源消耗强度向量 $f$ 代入式(1),可得基于最终需求的能源消耗 $E$ 的表达式:

$$E = \hat{f}(I - A)^{-1}Y \quad (2)$$

基于最终需求的生产端能源消耗( $E_p$ )和消费端能源消耗( $E_c$ )的表达式为:

$$E_p^s = \hat{f}(I - A)^{-1} \sum_{r=1}^{30} y^{sr} \quad (3)$$

$$E_c^s = \hat{f}(I - A)^{-1} \sum_{r=1}^{30} y^{rs} \quad (4)$$

式中: $y^{sr}$ 代表 $s$ 地区向 $r$ 地区提供的最终需求产品; $y^{rs}$ 代表 $r$ 地区向 $s$ 地区提供的最终需求产品。 $E_p$ 和

$E_c$ 的差额为区域间净能源消耗 $E_b$ ,若 $E_b > 0$ ,则该地区为生产型地区,反之为消费型地区。

从区域 $r$ 的 $i$ 部门转移到区域 $s$ 的 $j$ 部门的隐含能源消耗 $e_{ij}^{rs}$ 可以表示为<sup>[37]</sup>:

$$e_{ij}^{rs} = f_i^r l_{ij}^{rs} y_j^{ss} \quad (5)$$

式中: $f_i^r$ 为 $r$ 地区 $i$ 部门的直接能源消耗强度; $l_{ij}^{rs}$ 为 $s$ 地区 $j$ 部门满足 $r$ 地区 $i$ 部门一单位最终需求产品的总需求系数,是列昂惕夫逆矩阵的元素; $y_j^{ss}$ 表示 $s$ 地区 $j$ 部门满足 $s$ 地区的最终需求产品。

### 2.1.2 结构路径分析(SPA)

列昂惕夫逆矩阵可以反映工业路径的累积效应,将其通过泰勒级数法展开至 $n$ 个生产层级(Production Layer, PL):

$$(I - A)^{-1} = I + A + A^2 + A^3 + \dots + A^n \quad (6)$$

将式(6)代入式(2),最终需求导致的能源消耗可分解至各个生产层级:

$$E = \hat{f}(I - A)^{-1}Y = \hat{f}Y + \hat{f}AY + \hat{f}A^2Y + \hat{f}A^3Y + \dots + \hat{f}A^nY \quad (7)$$

式中: $\hat{f}A^nY$ 代表 $PL^{n-1}$ 层级的能源消耗; $\hat{f}Y$ 是各行业为满足最终需求品直接产生的能源消耗; $\hat{f}AY$ 表示为满足最终需求品所需的一次中间投入品所产生的能源消耗; $\hat{f}A^2Y$ 表示为满足最终需求品所需一次中间投入品的生产过程中,再次需要中间投入参与所导致的能源消耗,以此类推可得更高生产层级的能源消耗。

进一步地,可以追踪不同生产层级中生产链所传递的能源消耗。以 $p$ 部门为例, $i$ 和 $j$ 分别为其在 $PL^1$ 和 $PL^2$ 层的节点。那么 $PL^0$ 层的“ $p \rightarrow Y_p$ ”这一生产链中的能源消耗为:

$$E_p^0 = \hat{f}_p Y_p \quad (8)$$

$PL^1$ 层的“ $i \rightarrow p \rightarrow Y_p$ ”这一生产链中的能源消耗为:

$$E_{ip}^{1 \rightarrow 0} = \hat{f}_i A_{ip} Y_p \quad (9)$$

$PL^2$ 层的“ $j \rightarrow i \rightarrow p \rightarrow Y_p$ ”这一生产链中的能源消耗为:

$$E_{jip}^{2 \rightarrow 1 \rightarrow 0} = \hat{f}_j A_{ji} A_{ip} Y_p \quad (10)$$

更高生产层级的产业链路径的能源消耗以此类推可得。理论上生产层可以无限分解,生产链也可以无限延长。现有研究表明前几层的生产层在

总生产过程中占比较高<sup>[14,38]</sup>,且生产链条数随着生产层的增加呈现幂指数形式增加,因此没必要也不可能完全将生产层无限分解。在避免忽略重要生产路径的情况下,本文通过设定阈值,将小于该阈值的节点剔除(即在生产层级中不重要的节点),反之则保留。然后,以保留的节点为基础,计算节点代表的生产路径的能源消耗,并再计算下一层级节点的能源消耗,如此可以不断剔除任意生产层级中不重要的节点。最后,将得到的全部生产路径按能源消耗量大小进行排序,筛选出关键的生产路径。阈值的大小根据需要灵活设置,阈值越小,得到的生产路径越丰富,反之则越少。

### 2.2 数据来源

本文使用的中国多区域间投入产出表以及能源直接消耗量数据均来源于中国碳核算数据库(<https://www.ceads.net.cn/>)<sup>[39-43]</sup>,数据未包含西藏、港澳台地区。由于投入产出表的编制需要耗费大量的人力、物力与财力,当前中国省级多区域投入产出表更新较慢,目前可应用的最新数据为2017年,因此,本文的分析范围限定在2007—2017年,在此期间黄河流域的贸易隐含能源及其相关问题进行探讨。为确保投入产出表和能源直接消耗量数据的一致性,并尽可能保留原有部门分类,将投入产出表中的部门合并为18个部门(表1)。为消除通货膨胀因素的影响,使用相应价格指数将2010—2017年的现价投入产出表折算为以2007年为基期的可比价投入产出表,相关价格指数数据均来自2018年《中国统计年鉴》。

## 3 结果与分析

### 3.1 生产端和消费端的能源消耗

整体来看,黄河流域生产端能耗远高于消费端能耗,该流域整体表现为生产型能源区域,为中国其他省份提供了大量能源。从省份层面来看,黄河流域可分为生产型省份和消费型省份(图1)。2007—2017年,黄河流域9个省份大部分为生产型省份,尤其以内蒙古和山西为代表,这两个省份作为以煤炭为主的能源生产大省<sup>[44-46]</sup>,在此期间能源消耗量持续为正且逐年增加,2017年分别达到3117.9百万t和3098.0百万t。然而,陕西和河南的能源消耗量在2017年转为负值,表明这两个省份由生产型省份逐



2024年11月

表1 部门分类

Table 1 Sectoral classification

部门代码	部门	部门代码	部门
S1	农林牧渔业	S10	机械工业
S2	采选业	S11	交通运输设备
S3	食品和烟草业	S12	电气及电子设备
S4	纺织业	S13	其他制造业
S5	木材、家具、印刷、文教	S14	电力、热力、燃气及水的生产和供应业
S6	石油及化学工业	S15	建筑业
S7	非金属矿物制造业	S16	运输、仓储、邮政
S8	金属冶炼和压延加工业	S17	批发、零售、住宿、餐饮
S9	金属制造业	S18	其他服务业

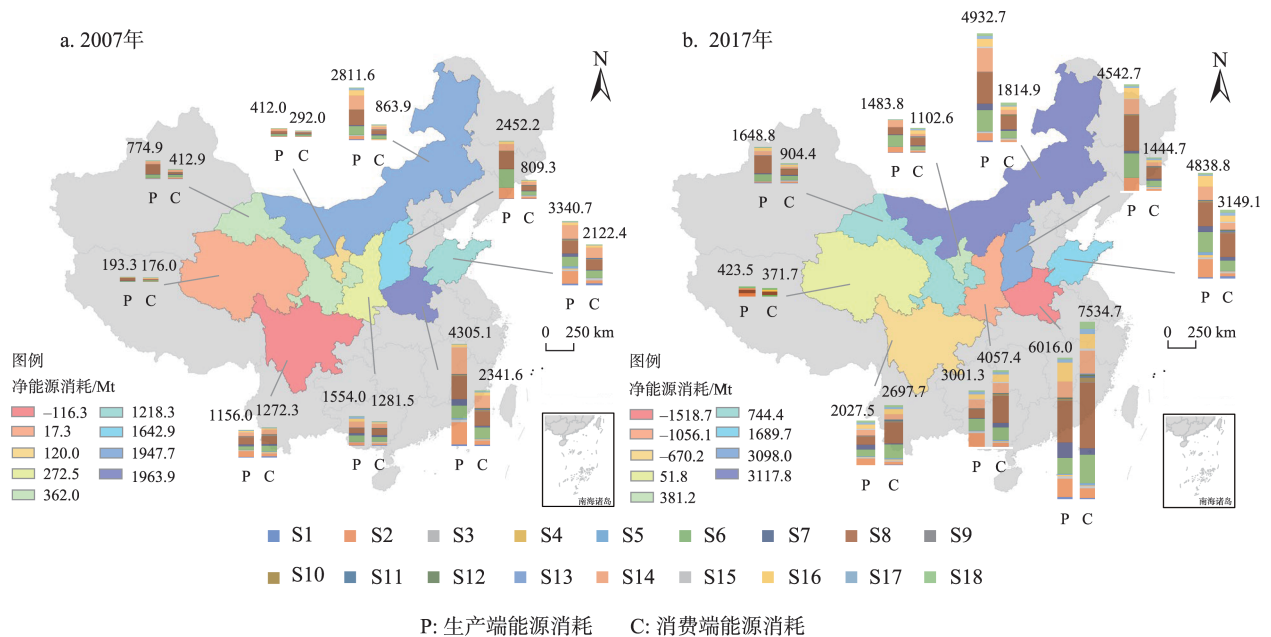


图1 2007—2017年黄河流域9个省份生产端和消费端的能源消耗量

Figure 1 Energy consumption on the production side and the consumption side in the nine provinces of the Yellow River Basin, 2007–2017

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2024)0650号标准地图制作,底图边界无修改。

渐转变为消费型省份,这种变化与2017年两地建立自由贸易试验区,致力于发展现代服务业和高端制造业的战略有关。四川省在2017年也呈现负值,相较于2007年显示出更显著的消费型特征。其他省份如青海、甘肃、宁夏和山东在此期间的能源消耗量一直为正,持续表现为生产型特征。

从部门层面整体来看,金属冶炼和压延加工业是基于生产端和消费端能耗最高的部门,其次是石油及化学工业以及电力、热力、燃气及水的生产和供应部门(图1)。具体而言,在生产型省份中,除宁夏能耗最高的生产端部门为石油及化学工业,其余

所有生产型省份最大的能耗部门均为金属冶炼和压延加工业。此外,在所有生产型省份中,能耗最高的消费端部门也为金属冶炼和压延加工业。在消费型省份中,河南和四川在生产端和消费端最大的能耗部门均为金属冶炼和压延加工业;而在陕西,最大的消费端部门是金属冶炼和压延加工业,最大的生产端部门则是采选业。通过分析不同省份最大的能耗行业,可以发现能源的分布受区域产业结构的影响显著。因此,改善贸易结构是缓解区域能源分布不均的关键。从以资源密集型产品为主的贸易结构转向以高附加值、低能耗产品为主的

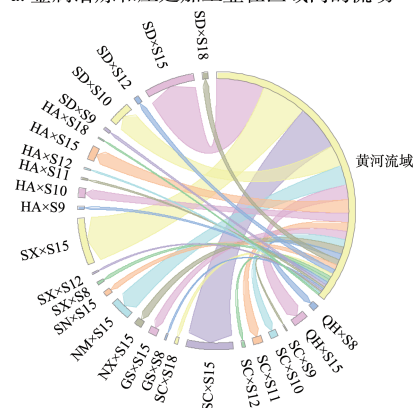
贸易结构,有助于各省以最低的能源损失和环境成本获得较高经济效益的可能途径。

### 3.2 隐含能源消耗的关键部门联系

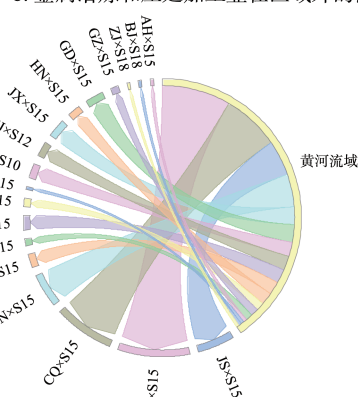
部门联系定义为特定部门与经济中其他部门之间通过直接或间接购买和销售商品而建立的关

系<sup>[47]</sup>。利用式(5)构建黄河流域能源消耗量最大的3个部门——金属冶炼和压延加工品,石油及化学工业以及电力、热力、燃气及水的生产和供应——向流域内外省际流动中各部门转移的能源消耗量(图2),以便于确定省际间部门的能源消耗责任。

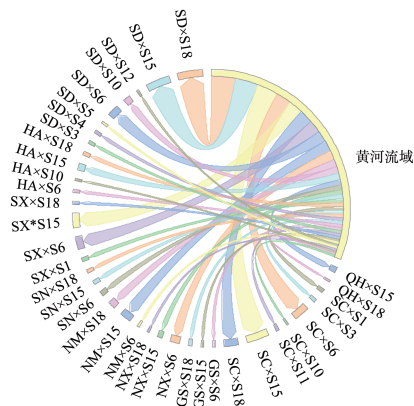
a. 金属冶炼和压延加工业在区域内的流动



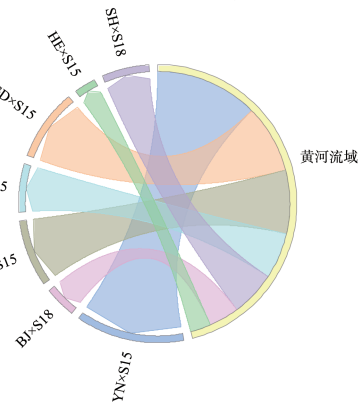
b. 金属冶炼和压延加工业在区域外的流动



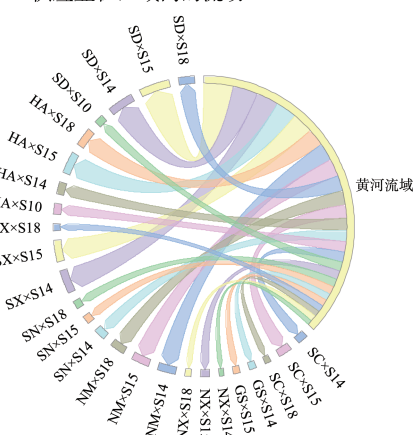
c. 石油及化学工业在区域内的流动



d. 石油及化学工业在区域外的流动



e. 电力、热力、燃气及水的生产和供应业在区域内的流动



f. 电力、热力、燃气及水的生产和供应业在区域外的流动

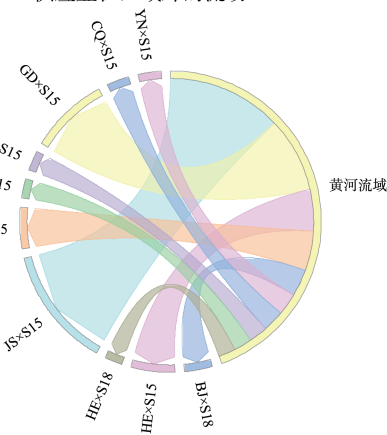


图2 黄河流域能源消耗前3部门的转移量 (Mt)

Figure 2 Transfer amounts of the top three energy-consuming sectors in the Yellow River Basin (Mt)

注:各省份简称使用2字母拼音缩写,需注意:河北(HE)、黑龙江(HL)、安徽(AH)、内蒙古(NM)、河南(HA)、陕西(SN),例如,SN×S8代表陕西(SN)的金属冶炼和压延加工业(S8)。

2024年11月

此外,为实现更简洁直观的可视化,本文筛选了部门间流动数据:在区域内,仅保留转移量超过0.5万t的值;在区域外,仅保留转移量超过0.2万t的值。

能源消耗转移在很大程度上是由最终消费需求驱动的。在流域内省际流动中,黄河流域建筑业和其他服务业的能源消耗主要由流域内金属冶炼和压延加工品提供,占比达68.1%(图2a、b),这与京津冀地区的需求由其他省份供给的情况<sup>[37]</sup>形成鲜明对比。在流域内与流域外的省际流动中,金属冶炼和压延加工品的能源消耗,主要流向东南沿海省份,如浙江、江苏、广东,以及北京、重庆两个直辖市和云南的建筑业。这与针对中国建筑业部门的能源消耗研究结果一致,浙江省在建筑业的能源消耗中是最主要的净进口省份<sup>[26]</sup>。黄河流域金属冶炼和压延加工品用于自身发展的能源消耗占比达68.5%,向东南沿海省份流出的能源占比为13.3%,而向直辖市流出的能源占比为3.9%。由此可见,黄河流域作为中国的能源区域,不仅为自身的发展和建设做出巨大贡献,还为东南沿海的发达省份,北

京2个直辖市、以及重庆和云南的基础设施建设做出了较大贡献。

在流域内省际流动中,金属冶炼和压延加工品的生产从低能源消耗强度向高能源消耗强度转移,其产业链网络的存在是高效的,可以有效减少能源的使用(表2)。以2017年河南金属冶炼和压延加工品到陕西建筑部门这一生产链为例。若这些产品在陕西当地生产,则将造成58.1百万t的能源消耗。由于河南的能源消耗强度低于陕西,河南提供产品的能源消耗仅为48.9百万t。这一产业链促使黄河流域的能源消耗减少了9.2百万t,有效减少了能源的过度使用。然而,在黄河流域为流域外省份提供能源的产业链中,存在这样的情况:生产区的金属冶炼和压延加工品的能源消耗强度高于消费区,从而导致产业链网络效率低下(表3)。例如,内蒙古为浙江建筑业提供金属冶炼和压延加工品,若这些供应的产品在浙江本地生产,仅需使用26.0百万t能源。但由于内蒙古的能源消耗强度高于浙江,其生产的金属冶炼和压延加工品使用的能源为106.5百万t。因此,这条产业链导致能源消耗增加了80.5

表2 黄河流域能源消耗前3部门产业链网络的贸易能耗平衡表

Table 2 The trade energy consumption balance sheet of the top three energy consumption sectors in the industrial chain network of the Yellow River Basin

产业链				非本地生产/Mt	本地生产/Mt	贸易能耗的平衡/Mt
来源地	来源地能源强度/(t/万元)	目的地	目的地能源强度/(t/万元)			
河南(S8)	63.0(S8)	陕西(S15)	74.9(S8)	48.9	58.1	-9.2
河南(S8)	63.0(S8)	四川(S15)	154.1(S8)	37.2	91.1	-53.9
山东(S8)	70.2(S8)	陕西(S15)	74.9(S8)	23.3	24.9	-1.6
山东(S8)	70.2(S8)	四川(S15)	154.1(S8)	18.0	39.5	-21.5
陕西(S8)	74.9(S8)	四川(S15)	154.1(S8)	12.1	25.0	-12.9
陕西(S8)	74.9(S8)	内蒙古(S15)	74.9(S8)	6.1	14.1	-8.0
山东(S6)	17.4(S6)	河南(S15)	20.1(S6)	29.2	33.7	-4.5
山东(S6)	17.4(S6)	陕西(S15)	49.9(S6)	14.3	41.1	-26.8
河南(S6)	20.1(S6)	陕西(S15)	49.9(S6)	14.2	35.3	-21.1
河南(S6)	20.1(S6)	内蒙古(S15)	157.2(S6)	8.7	68.2	-59.5
陕西(S6)	49.9(S6)	四川(S15)	52.9(S6)	10.2	10.8	-0.6
陕西(S6)	49.9(S6)	内蒙古(S15)	157.2(S6)	5.1	16.1	-11.0
山东(S14)	73.6(S14)	河南(S15)	84.2(S14)	22.2	25.4	-3.2
山东(S14)	73.6(S14)	河南(S18)	84.2(S14)	16.6	19.0	-2.4
河南(S14)	84.2(S14)	陕西(S15)	113.9(S14)	16.2	21.9	-5.7
河南(S14)	84.2(S14)	内蒙古(S15)	151.8(S14)	10.3	18.5	-8.2
甘肃(S14)	95.9(S14)	陕西(S15)	113.9(S14)	5.1	6.0	-0.9
甘肃(S14)	95.9(S14)	内蒙古(S15)	151.8(S14)	1.9	3.1	-1.2

表3 黄河流域与区域外能源消耗前3部门产业链网络的贸易能耗平衡表

Table 3 The trade energy consumption balance sheet of the top three energy consumption sectors in the industrial chain network between the Yellow River Basin and external regions

产业链				非本地生产/Mt	本地生产/Mt	贸易能耗的平衡/Mt
来源地	来源地能源强度/(t/万元)	目的地	目的地能源强度/(t/万元)			
河南(S8)	63.0(S8)	云南(S15)	135.1(S8)	77.6	166.5	-88.9
内蒙古(S8)	172.7(S8)	浙江(S15)	42.1(S8)	106.5	26.0	80.5
山西(S8)	243.3(S8)	浙江(S15)	42.1(S8)	77.0	13.3	63.7
河南(S8)	63.0(S8)	浙江(S15)	42.1(S8)	138.1	92.3	45.8
内蒙古(S8)	172.7(S8)	重庆(S15)	82.9(S8)	87.4	41.9	45.5
山西(S8)	243.3(S8)	江苏(S15)	85.1(S8)	65.9	23.1	42.8
甘肃(S8)	142.0(S8)	浙江(S15)	42.1(S8)	53.5	15.9	37.6
河南(S8)	63.0(S8)	重庆(S15)	82.9(S8)	106.0	139.5	-33.5
山东(S8)	70.2(S8)	浙江(S15)	42.1(S8)	81.7	49.0	32.7
甘肃(S8)	142.0(S8)	重庆(S15)	82.9(S8)	69.3	40.5	28.8
河南(S6)	20.1(S6)	云南(S15)	84.3(S6)	28.2	118.5	-90.3
山东(S6)	17.4(S6)	上海(S18)	49.3(S6)	32.0	90.6	-58.6
山西(S6)	196.0(S6)	江苏(S15)	22.1(S6)	33.8	3.8	30.0
山西(S6)	196.0(S6)	上海(S18)	49.3(S6)	34.3	8.6	25.7
山西(S6)	196.0(S6)	河北(S15)	38.8(S6)	30.4	6.0	24.4
内蒙古(S6)	157.2(S6)	江苏(S15)	22.1(S6)	25.8	3.6	22.2
内蒙古(S6)	157.2(S6)	浙江(S15)	19.1(S6)	22.0	2.7	19.3
陕西(S6)	49.9(S6)	云南(S15)	84.3(S6)	21.1	35.7	-14.6
内蒙古(S6)	157.2(S6)	云南(S15)	84.3(S6)	28.7	15.4	13.3
宁夏(S6)	149.3(S6)	广东(S15)	18.7(S6)	13.3	1.7	11.6
内蒙古(S14)	151.8(S14)	北京(S18)	8.2(S14)	34.8	1.9	32.9
内蒙古(S14)	151.8(S14)	江苏(S15)	75.1(S14)	32.7	16.2	16.5
河南(S14)	84.2(S14)	广东(S15)	55.2(S14)	42.3	27.7	14.6
河南(S14)	84.2(S14)	云南(S15)	48.4(S14)	28.5	16.4	12.1
山西(S14)	143.3(S14)	江苏(S15)	75.1(S14)	24.7	12.9	11.8
河南(S14)	84.2(S14)	浙江(S15)	19.1(S14)	26.6	15.9	10.7
内蒙古(S14)	151.8(S14)	河北(S15)	110.4(S14)	28.0	20.4	7.6
宁夏(S14)	160.1(S14)	广东(S15)	55.2(S14)	10.7	3.7	7.0
山东(S14)	73.6(S14)	广东(S15)	55.2(S14)	27.8	20.8	7.0
陕西(S14)	113.9(S14)	广东(S15)	55.2(S14)	13.1	6.3	6.8

百万 t。

石油及化学工业的隐含能源消耗传输模式与金属冶炼和压延加工品的传输模式相似。在流域内的省际流动中,黄河流域建筑业和其他服务业的能源消耗主要由流域内石油及化学工业提供,占比达 55.4%(图 2c、d)。在流域内与流域外的省际流动中,石油及化学工业的能源消耗最主要流向中国东南沿海省份的广东、浙江、江苏及北京的建筑业和其他服务业。虽然,黄河流域石油及化学工业的能

源消耗强度高于东南沿海省份,但却低于西南地区。该行业对东南沿海省份建筑业的产业链增加了能源消耗,而对西南地区(云南)建筑业的产业链减少了能源消耗。因此,东南沿海省份自身资源禀赋不能满足生产需求而从外省调入时,可给予一定的能源生态环境补偿以实现国家层面的经济高质量发展与双碳治理目标。另外,山东石油及化学工业对上海其他服务业的产业链也减少了能源的使用,这条产业链是高效的。



2024年11月

在流域内的省际流动中,黄河流域建筑业和其他服务业的能源消耗主要由流域内电力、热力、燃气及水的生产和供应业提供,占比达51.2%(图2e、f)。在流域内与流域外的省际流动中,电力、热力、燃气及水的生产和供应业的能源消耗,最主要流向东南沿海省份的浙江、江苏、广东和北京、重庆的建筑业及其他服务业。黄河流域电力、热力、燃气及水的生产和供应业的能源强度均高于东南沿海省份、北京、河北和云南地区,这些产业链的存在增加了黄河流域能源消耗的总量,这一结果与前文黄河流域多为生产型省份一致,表明黄河流域为发达地区的消费承担了一部分的能源消耗责任。

### 3.3 隐含能源消耗的关键产业链路径分析

从主要来源到最终需求的能源消耗,涉及沿着产业链进行的一系列复杂的转移过程。除了从基于生产和消费的角度确定关键部门外,还需要揭示其中间传递过程。本文基于SPA模型将2017年黄河流域每个省18个部门的整个生产过程分解为不同的生产层,如图3所示,可以发现黄河流域大部分能源消耗都集中在前5个生产层,较高生产层涉及的复杂生产活动所造成的能源消耗所占比例相对较低,这与其他类似研究结果一致<sup>[14,38]</sup>。从 $PL^0$ 到

$PL^4$ 累积的能源消耗占全部的87.7%。其中,有8个部门的主要能源消耗集中在 $PL^0$ 层,如建筑业、其他服务业和机械工业,占比分别达到97.5%、57.5%和55.1%。有8个部门的主要能源消耗集中在 $PL^1$ 层,如非金属矿物制造业和金属制造业,占比分别达到69.8%和50.9%。采选业和电力、热力、燃气及水的生产和供应业的主要能源消耗集中在 $PL^1$ 层,占比分别达到23.2%和30.5%。表明能源消耗除了集中在 $PL^0$ 层,还隐含在其他部门复杂的生产活动中,因此有必要提取这些生产层的产业链路径以供进一步分析。

表4列出黄河流域生产活动中能源消耗较多的前50条产业链路径及其隐含能耗量,这些路径转移了34.7%的能源消耗,且多是为了满足建筑业的最终需求。这表明控制关键路径可以有效地降低能源消耗。从不同生产层来看,黄河流域最终需求品4.1%的能源消耗是基于 $PL^0$ 层的9条直接路径,其中4条路径用于满足建筑业的最终需求,占 $PL^0$ 层路径的47.6%;最终需求品27.7%的能源消耗基于 $PL^1$ 层包含一次中间投入的35条间接路径,其中21条路径为建筑业的最终需求服务,占 $PL^1$ 层路径的72.9%;最终需求品2.9%的能源消耗基于 $PL^2$ 层涉

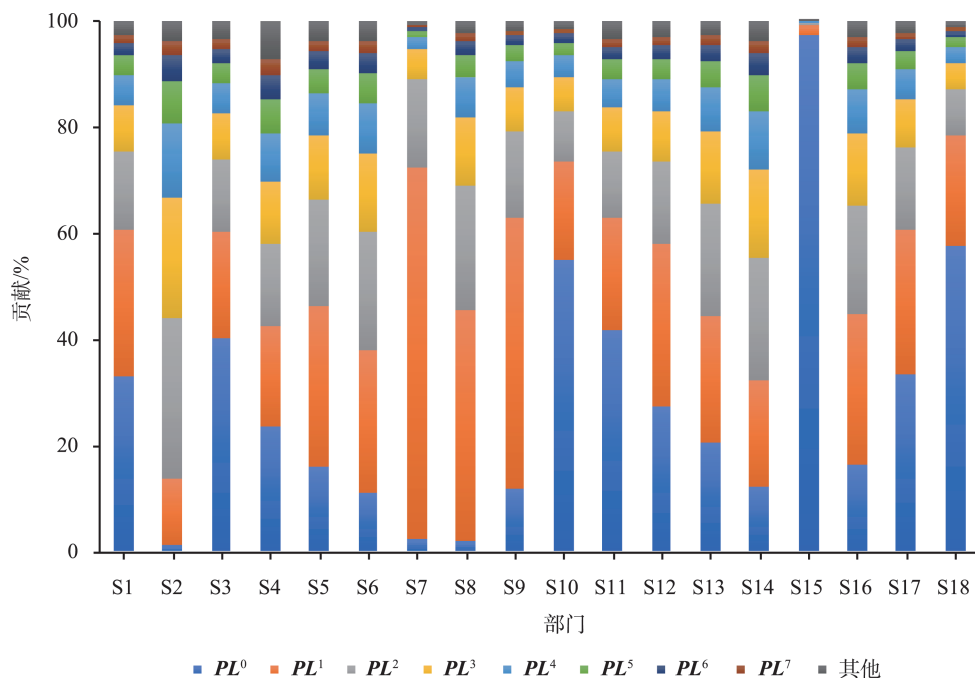


图3 黄河流域不同生产层级对能源最终需求的贡献

Figure 3 Contribution of different production levels to final energy demand in the Yellow River Basin



表4 黄河流域前50条能源消耗关键路径

Table 4 Top 50 critical paths of energy consumption in the Yellow River Basin (Mt)

序号	隐含能耗	路径	层级	序号	隐含能耗	路径	层级
1	2139.6	SX×S8→SX×S15	PL <sup>1</sup>	26	418.5	GS×S8→GS×S15	PL <sup>1</sup>
2	2010.0	SC×S7→SC×S15	PL <sup>1</sup>	27	414.0	SC×S6→SC×S18	PL <sup>1</sup>
3	1732.8	SC×S8→SC×S15	PL <sup>1</sup>	28	412.6	SX×S6	PL <sup>0</sup>
4	1449.2	SD×S7→SD×S15	PL <sup>1</sup>	29	411.7	NM×S15	PL <sup>0</sup>
5	1315.7	SD×S8→SD×S15	PL <sup>1</sup>	30	404.6	SC×S7→SC×S7→SC×S15	PL <sup>2</sup>
6	1169.0	NM×S8→NM×S15	PL <sup>1</sup>	31	397.6	SX×S8→SX×S8→SX×S15	PL <sup>2</sup>
7	997.3	NM×S7→NM×S15	PL <sup>1</sup>	32	394.8	SN×S8→SN×S15	PL <sup>1</sup>
8	790.8	HA×S7→HA×S15	PL <sup>1</sup>	33	391.3	HA×S10→HA×S10	PL <sup>1</sup>
9	647.3	SD×S6→SD×S18	PL <sup>1</sup>	34	370.3	SC×S9→SC×S15	PL <sup>1</sup>
10	639.0	SD×S10→SD×S10	PL <sup>1</sup>	35	359.2	SC×S8→SC×S8→SC×S15	PL <sup>2</sup>
11	628.2	SD×S8→SD×S10	PL <sup>1</sup>	36	344.8	HA×S3→HA×S3	PL <sup>1</sup>
12	577.7	QH×S8→QH×S15	PL <sup>1</sup>	37	342.6	NM×S18→NM×S18	PL <sup>1</sup>
13	533.4	HA×S8→HA×S15	PL <sup>1</sup>	38	336.0	HA×S18→HA×S18	PL <sup>1</sup>
14	529.0	SD×S9→SD×S15	PL <sup>1</sup>	39	329.7	SD×S4→SD×S4	PL <sup>1</sup>
15	523.0	SD×S18→SD×S18	PL <sup>1</sup>	40	329.6	SD×S6→SD×S6→SD×S18	PL <sup>2</sup>
16	507.9	SD×S3→SD×S3	PL <sup>1</sup>	41	323.6	NX×S8→NX×S15	PL <sup>1</sup>
17	504.8	SC×S15	PL <sup>0</sup>	42	314.9	SD×S6→SD×S15	PL <sup>1</sup>
18	486.9	SD×S8→SD×S8→SD×S15	PL <sup>2</sup>	43	305.1	SC×S18	PL <sup>0</sup>
19	465.4	SD×S7→SD×S7→SD×S15	PL <sup>2</sup>	44	300.5	SD×S6→SD×S6	PL <sup>1</sup>
20	464.8	SX×S7→SX×S15	PL <sup>1</sup>	45	292.9	SX×S6→SX×S15	PL <sup>1</sup>
21	456.5	HA×S8→HA×S10	PL <sup>1</sup>	46	286.8	NM×S6→NM×S15	PL <sup>1</sup>
22	453.4	SD×S18	PL <sup>0</sup>	47	281.3	SN×S7→SN×S15	PL <sup>1</sup>
23	450.1	SC×S18	PL <sup>0</sup>	48	280.9	SD×S5→SD×S18	PL <sup>1</sup>
24	427.6	SD×S15	PL <sup>0</sup>	49	273.3	SD×S15	PL <sup>0</sup>
25	426.4	SC×S6→SC×S15	PL <sup>1</sup>	50	269.7	SC×S6	PL <sup>0</sup>

注:省份简写:青海(QH),四川(SC),甘肃(GS),宁夏(NX),内蒙古(NM),陕西(SN),山西(SX),河南(HA),山东(SD);例如, SX×S8代表山西(SX)的金属冶炼和压延加工品(S8)。

及两次中间投入的6条间接路径,其中5条路径用于满足建筑业的最终需求,占PL<sup>2</sup>层路径的86.5%。因此,基于产业链路径的节能措施,不仅可以关注到生产端和消费端的能源消耗,还可以关注到产业链中间环节的能源消耗,能够更加有效的实现能源消耗的减少。

4 结论与政策建议

4.1 结论

本文基于MRIO模型,探讨了2007—2017年黄河流域省际贸易隐含能源格局演变,以及隐含能源消耗的关键部门联系;并通过SPA模型,挖掘相应能源消耗较高的关键路径和行业,以期通过产业链来减少能源消耗量。主要结论如下:

(1)2007—2017年,黄河流域整体为生产型能

源区域。从各省份的能源消耗特征来看,陕西和河南在2017年由生产型能耗省份转变为消费型能耗省份,山西和内蒙古是黄河流域典型的生产型能耗大省。金属冶炼和压延加工品,石油及化学工业,电力、热力、燃气及水的生产和供应是黄河流域中生产端和消费端能源消耗最大的3个部门。

(2)流域内省际间的能源产业链格局总体上是高效的,从低排放强度省份向高排放强度省份延伸,而流域内与流域外省份间的产业链格局则相反。黄河流域关键省际产业链路径主要终止于东南沿海省份以及北京和重庆的建筑部门和其他服务业的最终需求,山西的金属冶炼和压延加工品部门是黄河流域重要的产业链节点。

(3)流域内87.7%的能源消耗集中在前5层

2024年11月

( $PL^0-PL^4$ ), 隐藏在产业链路径中的能源消耗需受到关注。黄河流域前 50 条产业链路径转移了全部能源消耗的 34.7%, 且多是为了满足建筑业的最终需求。

## 4.2 政策建议

根据以上结论, 从不同角度提出节能政策建议:

(1) 从消费角度, 采取一些引导、激励或强制措施来降低发达省份, 如东南沿海省份及直辖市的关键部门和关键最终需求的隐含能源消耗。对于建筑业和其他服务业等关键行业, 可在建筑产品及其他服务产品上引入隐含能源标签, 促使企业生产低隐含能源的产品。对于关键的最终需求, 在不影响人民生活和经济发展的前提下, 适度减少建筑产品及其他服务产品的消耗。

(2) 从生产角度, 通过技术转让和技术援助来降低生产型省份的能源消耗强度。如在产业链关键节点省份间建立资本技术合作体系, 提高黄河流域金属冶炼和压延加工品、石油及化学工业以及电力、热力、燃气及水的生产和供应等关键初级能源消耗部门的能源利用效率, 进而减少这些部门的隐含能源消耗。

(3) 从产业链角度, 建立跨部门协同机制, 从区域联防联控体系设计合理的区域能源消耗责任界定方法。除了界定生产端和消费端的责任, 并采取节能措施外, 还应考虑中间投入过程, 鼓励产业链中的部门使用更少的中间产品或节能替代品以减少隐含能源消耗, 利用生产产业链来减少能源消耗, 即从低能源消耗强度地区向高能源消耗强度地区供应。

由于多区域投入产出表更新较慢, 本文尽量选择长时间跨度的多区域投入产出表对黄河流域贸易隐含能源格局演变、关键部门产业链网络以及关键路径进行研究, 以抵消数据时效性带来的问题。此外, 本文所采用的 MRIO 模型估算和 SPA 的方法可以被广泛应用于未来不同地区、不同能源消耗、不同排放的相关研究中, 将有助于区域尺度减污降碳节能的目标实现。

## 参考文献(References):

[1] International Energy Agency (IEA). An energy sector roadmap to

Carbon Neutrality in China[R/OL]. (2021-09) <https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china?language=zh>, Licence: CC BY 4.0.

- [2] He W J, Chen H. Will China's provincial per capita energy consumption converge to a common level over 1990-2017? Evidence from a club convergence approach[J]. *Energy*, 2022, DOI: 10.1016/j.energy.2022.123624.
- [3] Wang J, Zhang S L, Zhang Q J. The relationship of renewable energy consumption to financial development and economic growth in China[J]. *Renewable Energy*, 2021, 170: 897-904.
- [4] 周彦楠, 何则, 马丽, 等. 中国能源消费结构地域分布的时空分异及影响因素[J]. *资源科学*, 2017, 39(12): 2247-2257. [Zhou Y N, He Z, Ma L, et al. Spatial and temporal differentiation of China's provincial scale energy consumption structure[J]. *Resources Science*, 2017, 39(12): 2247-2257.]
- [5] 何则, 杨宇, 宋周莺, 等. 中国能源消费与经济增长的相互演进态势及驱动因素[J]. *地理研究*, 2018, 37(8): 1528-1540. [He Z, Yang Y, Song Z Y, et al. The mutual evolution and driving factors of China's energy consumption and economic growth[J]. *Geographical Research*, 2018, 37(8): 1528-1540.]
- [6] 高丹, 孔庚, 麻林巍, 等. 我国区域能源现状及中长期发展战略重点研究[J]. *中国工程科学*, 2021, 23(1): 7-14. [Gao D, Kong G, Ma L W, et al. Energy development status and developing focus of varied regions in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(1): 7-14.]
- [7] 李雯轩, 李晓华. 新发展格局下区域间产业转移与升级的路径研究: 对“雁阵模式”的再探讨[J]. *经济学家*, 2021, (6): 81-90. [Li W X, Li X H. Research on the path of inter-regional industrial transfer and upgrading under the new development pattern: A re-discussion of the "Flying Geese Model"[J]. *Economist*, 2021, (6): 81-90.]
- [8] Yang Y. Energy globalization of China: Trade, investment, and embedded energy flows[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2022, 32(3): 377-400.
- [9] Yang Y, Zhou Y N, Shan Y L, et al. The shift of embodied energy flows among the global south and global north in the post-globalisation era[J]. *Energy Economics*, 2024, DOI: 10.1016/j.eneco.2024.107408.
- [10] Wang Q, Jiang F, Li R R. Assessing supply chain greenness from the perspective of embodied renewable energy: A data envelopment analysis using multi-regional input-output analysis[J]. *Renewable Energy*, 2022, 189: 1292-1305.
- [11] Song X X, Li R R. Tracing and excavating critical paths and sectors for embodied energy consumption in global supply chains: A case study of China[J]. *Energy*, 2023, DOI: 10.1016/j.energy.2023.129244.

- [12] Lin B Q, Wang C H. Does industrial relocation affect green total factor energy efficiency? Evidence from China's high energy-consuming industries[J]. *Energy*, 2024, DOI: 10.1016/j.energy.2023.130002.
- [13] Wen Q, Gu J, Hong J, et al. Unfolding interregional energy flow structure of China's construction sector based on province-level data[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109693.
- [14] Shi J L, Li C, Li H J. Energy consumption in China's ICT sectors: From the embodied energy perspective[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, DOI: 10.1016/j.rser.2022.112313.
- [15] Zhang B, Qiao H, Chen B. Embodied energy uses by China's four municipalities: A study based on multi-regional input-output model[J]. *Ecological Modelling*, 2015, 318: 138–149.
- [16] Acquaye A A, Wiedmann T, Feng K, et al. Identification of 'Carbon Hot-Spots' and quantification of GHG intensities in the biodiesel supply chain using hybrid LCA and structural path analysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(6): 2471–2478.
- [17] Hu M M, Chen S Q, Wang Y F, et al. Identifying the key sectors for regional energy, water and carbon footprints from production-, consumption- and network-based perspectives[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142821.
- [18] Wang S G, Cao T, Chen B. Identifying critical sectors and supply chain paths for virtual water and energy-related water trade in China[J]. *Applied Energy*, 2021, DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117294.
- [19] Sun X D, Liu Y, Guo S, et al. Interregional supply chains of Chinese mineral resource requirements[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123514.
- [20] Peng J Y, Xie R, Lai M Y. Energy-related CO<sub>2</sub> emissions in the China's iron and steel industry: A global supply chain analysis[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 129: 392–401.
- [21] Guan S H, Han M Y, Wu X F, et al. Exploring energy-water-land nexus in national supply chains: China 2012[J]. *Energy*, 2019, 185: 1225–1234.
- [22] Deng H M, Wang C, Cai W J, et al. Managing the water-energy-food nexus in China by adjusting critical final demands and supply chains: An input-output analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137635.
- [23] Sun C W, Ouyang X L, Cai H B, et al. Household pathway selection of energy consumption during urbanization process in China[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 84: 295–304.
- [24] Pang Q H, Dong X W, Zhang L N, et al. Drivers and key pathways of the household energy consumption in the Yangtze River economic belt[J]. *Energy*, 2023, DOI: 10.1016/j.energy.2022.125404.
- [25] Li Z, Cai Y P, Lin G. Pathways for sustainable municipal energy systems transition: A case study of Tangshan, a resource-based city in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129835.
- [26] Hong J K, Gu J P, Liang X, et al. Characterizing embodied energy accounting with a multi-dimensional framework: A study of China's building sector[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 215: 154–164.
- [27] 曲永义. 以产业链协同推动黄河流域生态保护和高质量发展[J]. *城市与环境研究*, 2023, (1): 3–7. [Qu Y Y. Promoting ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin through industrial chain collaboration[J]. *Urban and Environmental Studies*, 2023, (1): 3–7.]
- [28] 生态环境部环境规划院. 黄河流域“十四五”结构调整与低碳发展规划政策研究报告[R/OL]. (2021–12–01) [2024–05–20]. <https://www.efchina.org/14FYP-zh/Reports-zh/report-cemp-202305-6-zh>. [Chinese Academy of Environmental Planning. Structural Adjustment and Low Carbon Development of Yellow River Basin During the 14th Five-Year Plan Period[R/OL]. (2021–12–01) [2024–05–20]. <https://www.efchina.org/14FYP-zh/Reports-zh/report-cemp-202305-6-zh>.]
- [29] 陆大道, 孙东琪. 黄河流域的综合治理与可持续发展[J]. *地理学报*, 2019, 74(12): 2431–2436. [Lu D D, Sun D Q. Development and management tasks of the Yellow River Basin: A preliminary understanding and suggestion[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(12): 2431–2436.]
- [30] 吕倩, 刘海滨. 基于夜间灯光数据的黄河流域能源消费碳排放时空演变多尺度分析[J]. *经济地理*, 2020, 40(12): 12–21. [Lu Q, Liu H B. Multiscale spatiotemporal characteristics of carbon emission of energy consumption in Yellow River Basin based on the nighttime light datasets[J]. *Economic Geography*, 2020, 40(12): 12–21.]
- [31] 杜海波, 魏伟, 张学渊, 等. 黄河流域能源消费碳排放时空格局演变及影响因素: 基于DMSP/OLS与NPP/VIIRS夜间灯光数据[J]. *地理研究*, 2021, 40(7): 2051–2065. [Du H B, Wei W, Zhang X Y, et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of energy-related carbon emissions in the Yellow River Basin: Based on the DMSP/OLS and NPP/VIIRS nighttime light data[J]. *Geographical Research*, 2021, 40(7): 2051–2065.]
- [32] Song M, Zhang L Y, Gao Y, et al. Spatiotemporal evolution and influence mechanism of the carbon footprint of energy consumption at county level in the Yellow River Basin[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163710.
- [33] 岳立, 任婉瑜. 黄河流域城市能源综合效率时空分异与影响因素研究[J]. *地理科学*, 2024, 44(4): 630–639. [Yue L, Ren W Y. Spatio-temporal distribution and influencing factors of urban comprehensive energy efficiency in the Yellow River Basin[J]. *Scientia*

2024年11月

- Geographica Sinica, 2024, 44(4): 630–639.]
- [34] 王锐, 祝笑笑, 彭艳艳, 等. 2000–2020年黄河流域水–能源–粮食系统耦合协调时空演变特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 354–362. [Wang R, Zhu X X, Peng Y Y, et al. Spatio-temporal characteristics of water–energy–food coupling coordination in the Yellow River Basin in the period from 2000 to 2020[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 354–362.]
- [35] 迟妍妍, 王夏晖, 刘斯洋, 等. 黄河流域水–能源–生态系统协同增效战略体系构建研究[J]. 环境科学研究, 2024, 37(1): 11–23. [Chi Y Y, Wang X H, Liu S Y, et al. Research on the construction path of coordinated strategy of water–energy–ecosystem of the Yellow River Basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(1): 11–23.]
- [36] 王兆华, 邹朋宇, 李浩, 等. 经济–能源–水耦合视角下黄河流域区域协同发展路径[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(8): 10–19. [Wang Z H, Zou P Y, Li H, et al. Path of regional coordinated development in the Yellow River Basin from the perspective of economy–energy–water nexus[J]. China Population Resources and Environment, 2022, 32(8): 10–19.]
- [37] Sun Y, Wang Y, Zheng H R, et al. Critical supply chains of NO<sub>x</sub> emissions in the Beijing–Tianjin–Hebei urban agglomeration[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132379.
- [38] Zhang B, Qu X, Meng J, et al. Identifying primary energy requirements in structural path analysis: A case study of China 2012[J]. Applied Energy, 2017, 191: 425–435.
- [39] 刘卫东, 陈杰, 唐志鹏. 中国2007年30省市区区域间投入产出表编制理论与实践[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012. [Liu W D, Chen J, Tang Z P. Theory and Practice of Compiling Interregional Input–Output Tables for 30 Provinces, Autonomous Regions, and Municipalities in China, 2007[M]. Beijing: China Statistics Press, 2012.]
- [40] 刘卫东, 唐志鹏, 陈杰. 2010年中国30省市区区域间投入产出表[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014. [Liu W D, Tang Z P, Chen J. 2010 Interregional Input–Output Tables of 30 Provinces, Autonomous Regions, and Municipalities in China[M]. Beijing: China Statistics Press, 2014.]
- [41] Zheng H R, Zhang Z K, Wei W D, et al. Regional determinants of China’s consumption–based emissions in the economic transition[J]. Environmental Research Letters, 2020, DOI: 10.1088/1748–9326/ab794f.
- [42] Shan Y L, Guan D B, Zheng H R, et al. China CO<sub>2</sub> emission accounts 1997–2015[J]. Scientific Data, 2018, DOI: 10.1038/sdata.2017.201.
- [43] Shan Y L, Huang Q, Guan D B, et al. China CO<sub>2</sub> emission accounts 2016–2017[J]. Scientific Data, 2020, DOI: 10.1038/s41597–020–0393–y.
- [44] 许馨戈. 内蒙古自治区工业能源碳排放影响因素分析[J]. 内蒙古科技与经济, 2023, (1): 77–81. [Xu X G. Analysis on the influencing factors of industrial energy carbon emission in inner Mongolia Autonomous Region[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2023, (1): 77–81.]
- [45] 齐璇璇, 黄蕊, 贾一越, 等. 煤炭资源型地区县域碳排放时空特征及驱动因素分析: 以山西省为例[J]. 华北水利水电大学学报(社会科学版), 2024, 40(4): 1–11. [Qi X X, Huang R, Jia Y Y, et al. Analysis of spatial and temporal characteristics and driving factors of carbon emissions at the county level in coal resource–based areas: Take Shanxi Province as an example[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Social Science Edition), 2024, 40(4): 1–11.]
- [46] 曲申, 宋怡藩, 张薇, 等. 中国省际能源高质量协同发展测度[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2024, 26(2): 45–54. [Qu S, Song Y F, Zhang W, et al. Evaluation and complementarity analysis of high–quality energy development in 30 provinces[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2024, 26(2): 45–54.]
- [47] Miller R E, Lahr M L. A taxonomy of extractions[J]. Contributions to Economic Analysis, 2001, 29(1): 407–441.



# Embedded energy flow and its industrial chain pathways in interprovincial trade within the Yellow River Basin

WU Leying<sup>1, 2, 3</sup>, ZHAO Yiyi<sup>1, 2</sup>, MIAO Changhong<sup>1, 2</sup>, ZHONG Zhangqi<sup>4</sup>, DU Jin<sup>1, 2, 3</sup>

(1. Laboratory of Climate Change Mitigation and Carbon Neutrality, Henan University, Zhengzhou 450046, China; 2. Key Research Institute of Yellow River Civilization and Sustainable Development & Collaborative Innovation Center on Yellow River Civilization Jointly Built by Henan Province and Ministry of Education, Henan University, Kaifeng 475001, China; 3. Henan Urban Planning and Design Research Institute Limited Company, Zhengzhou 450044, China; 4. School of Economics and Trade, Guangdong University of Foreign Studies, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** [Objective] Energy-related carbon emissions are a major cause of climate warming. Clarifying the patterns of energy embedded in interprovincial trade within the Yellow River Basin and identifying the industrial chain pathways of key sectors are crucial for reasonably controlling total energy consumption. This is of significant importance for achieving China's dual carbon goals and promoting high-quality development in the Yellow River Basin. [Methods] Based on the interregional input-output table data of 30 provinces in China's mainland from 2007 to 2017, this study applied a multi-regional input-output model and structural path analysis to explore the change of embedded energy patterns in interprovincial trade within the Yellow River Basin and to identify the industrial chain pathways of key sectors. [Results] (1) The Yellow River Basin as a whole is a production-oriented energy region, with the top three energy-consuming sectors being metal smelting and rolling processing, the petroleum and chemical industry, and the production and supply of electricity, heat, gas, and water. (2) The embedded energy patterns in interprovincial trade within the basin are generally efficient, extending from provinces with low energy consumption intensity to those with higher energy consumption intensity. In contrast, the energy patterns in trade between the basin and provinces outside the region showed the opposite trend. The key interprovincial industrial chain paths outside the region mainly serve the final demand of the construction sector and other service industries in the southeastern coastal provinces and municipalities. (3) Within the basin, 87.7% of energy consumption was concentrated in the top five production levels, with key paths leading to the construction industry embedding substantial energy consumption. [Conclusion] The Yellow River Basin can reduce total energy consumption by leveraging industrial chains from low energy intensity areas to high energy intensity areas. Effective measures such as establishing capital and technology cooperation systems among key provinces in the industrial chain can further reduce overall energy consumption.

**Key words:** embedded energy consumption; industrial chain; multi-regional input-output; structural path analyses; Yellow River Basin