

郭媛媛, 郭英, 刘峰贵, 等. 黄河上中游地区能源生产及其水足迹变化特征[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(5): 856-864, 908. GUO Y Y, GUO Y, LIU F G, et al. Energy production and water footprint changes in the upper and middle reaches of the Yellow River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(5): 856-864, 908. (in Chinese)

黄河上中游地区能源生产及其水足迹变化特征

郭媛媛^{1,2}, 郭英², 刘峰贵¹, 申一林², 李开梅^{1,2}, 沈彦俊²

(1. 青海师范大学地理科学学院, 西宁 810008; 2. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 石家庄 050022)

摘要:为揭示黄河上中游地区能源生产及其水足迹变化特征,基于能源统计数据,利用水足迹理论在市级尺度上定量分析能源产量、能源结构以及能源生产蓝水足迹的时空变化特征。结果表明:1990—2020年黄河上中游一次能源生产总量总体呈现上升趋势,从1.5亿t标准煤增至17.1亿t标准煤,全国占比由13.7%增至41%,空间上能源生产更加集中且重心向上游转移;近30年,黄河上中游能源生产结构中原煤比重呈下降态势,由93.3%减少至88%,天然气比例增加显著,以原煤为主的城市数量明显减少,清洁能源在其能源生产结构中的比重提升;能源生产蓝水足迹由1990年的4.64亿m³增至2010年为25.18亿m³,随着能源生产用水效率的提高和清洁能源比重的提升,能源生产蓝水足迹减少至2020年的24.24亿m³,其中能源加工蓝水足迹是能源生产蓝水足迹的主要组成部分,空间上能源生产蓝水足迹高值区向水资源短缺的“几字弯”地区集中,加剧了该区域的水资源供需矛盾。研究结果可为黄河上中游地区用水效率提升、能源生产结构优化以及能-水系统协同发展提供理论依据及决策参考。

关键词:能源结构;水足迹;黄河上中游;能-水关联关系;能源安全

中图分类号:TV213;P94 **文献标志码:**A **DOI:**10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0085

水资源是能源生产的基本条件^[1],能源开采、加工以及转换等环节都需要水资源的参与^[2]。2016年全球能源生产的用水量占全球淡水取用量的10%,2040年之前能源生产对水资源的需求会不断增长^[3]。在延续当前低碳转型的趋势和政策的情景下,预计2030年中国能源消费量相比2020年增加22.7%^[4],能源供应的稳定性及安全性成为能源开发利用的重中之重。黄河上中游地区煤炭资源总量占全国的52.2%^[5],是我国重要的能源生产区。然而,黄河整体自产水量不足且呈减少趋势^[6-7],干流生态流量赤字现象凸显^[8]。农业、生态和能源用水形成了激烈的竞争关系,水资源供需矛盾日益凸显^[9-10],能源生产面临用水危机。因此,明确黄河上中游能源生产变化及其生产水足迹变化特征对探索促进黄河上中游地区水-能可持续发展路径^[11]、流域高质量发展^[12]及我国能源安全具有重要意义。

水足迹由Hoekstra等^[13]引入并定义为一个国

家、地区或个人在一定时间内消费的所有产品和服务所需要的水资源数量。水足迹概念自提出以来,已迅速在全球和区域(国家、省等)等不同尺度上得到应用^[14],为水安全、粮食安全和生态安全等提供决策支持^[15]。能源水足迹用于表征能源在开采、加工、运输及消费等全生命周期过程中的水资源消耗,计算方法分为自上而下和自下而上两种^[16]。自上而下的方法多通过划分与合并不同的产业部门并利用投入产出模型来计算区域产业的能、水消耗量^[17-18]以及部门之间^[4,19]、区域内外^[20-21]的流动关系,更侧重于能源消费端的水足迹测算及分配问题^[22];而自下而上的方法更侧重于能源生产端的水足迹测算,如很多学者在国家、省域尺度上计算了原煤^[17]、原油、天然气、水力发电^[23]等主要一次能源^[24]以及二次能源火力发电^[25]生产过程中的蓝水足迹。在流域尺度上,孙才志等^[26]、高甜等^[27]以黄河流域9个省(区)为研究区,计算了主要能源的水足迹。以

收稿日期:2023-12-19 修回日期:2024-05-22 网络出版时间:2024-08-20

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/13.1430.tv.20240819.0904.004

基金项目:国家自然科学基金专项项目(42041007)

作者简介:郭媛媛(1997—),女,山西忻州人,主要从事自然地理综合研究。E-mail: guoyuanyuans@163.com

通信作者:郭英(1980—),女(回族),新疆伊犁人,副研究员,博士,主要从事流域水-能-粮耦合模型及关联机制研究。E-mail:

guoy@sziat.ac.cn

沈彦俊(1971—),男,河北张家口人,研究员,博士,主要从事农业水文与水资源研究。E-mail: yjshen@sziat.ac.cn

省级行政单位为最小研究单位在一定程度上可以揭示流域能-水关系,但不能准确地反映流域能源生产的水资源供需关系,对能源加工过程以及清洁电力的水足迹也探讨不足。本文以地市为研究单元,选择黄河上中游7个省42个地级市(州、盟)为研究区,计算并分析1990—2020年一次能源原煤、原油、天然气产量和水力、光伏和风力发电量,以及二次能源焦炭产量和火力发电量的变化及能源结构的变化特征,并采用水足迹方法估算黄河上中游地区能源生产的蓝水足迹变化特征,研究结果将为保障我国能源安全生产及黄河上中游能-水的协同发展提供科学支撑。

1 研究区概况

黄河上中游地区位于32°N~42°N和96°E~114°E,连接青藏高原、内蒙古高原和黄土高原,是我国重要的生态屏障。研究区主要包括42个地级市(州、盟),人口约为1.1亿人。区域多年平均降水量约461.4 mm,多年平均水资源总量为717亿m³,数据参考2000—2020年《中国水资源公报》。黄河上中游地区作为我国重要的能源基地,目前和未来仍是我国能源的主要供给区。区域内能源种类丰富、储量大,主要包括原煤、原油、天然气以及水光风电资源。“几字弯”区域煤炭储量约占全国总量的三分之二,分布有多个大型煤炭基地。鄂尔多斯盆地成为我国油气产业新高地,其中,延长油田探明石油地质储量30亿t以上、长庆油田含有4个10亿t级大油区和3个万亿m³大气区^[28]。黄河上中游地区地势西高东低、起伏较大,是黄河径流的主要来源区^[29],上中游干流水能资源理论蕴藏量31167 MW,占黄河干流的94.94%^[30]。该区风能和光能资源也较为丰富,分布有我国重点发展的九大清洁能源基地中的黄河上游清洁能源基地和几字弯清洁能源基地。

2 方法与数据

2.1 能源生产蓝水足迹核算方法

能源生产蓝水足迹可分为开采以及加工两个部分,开采蓝水足迹包括原煤开采、原油开采、天然气开采以及清洁能源发电,加工蓝水足迹包括原煤洗选、火力发电、炼焦以及原油加工。煤炭产业在开采、洗选、转化等阶段需要水资源投入^[31],原煤在开采过程中需要利用水进行降尘处理、设备冷却等,开采出来后一部分煤炭需要利用水进行洗选,降低

煤中灰分和硫的含量,提高煤的质量并降低污染,方便运输及下一步转化利用。火力发电以及炼焦是煤炭转化利用的主要领域,水需求用于冷却系统^[25]。原油及天然气开采中,注水开采等过程将会消耗大量水资源,加工成品油过程中也需要水资源的参与。光伏在发电过程中不需要水资源的直接参与,但需要定时清洗发电板来降低灰尘对发电效率的影响^[32]。此外,水力发电耗水量主要来自水库的蒸发和渗漏^[33],但水库的功能除了发电外,还包括如蓄水灌溉、防洪防涝等重要功能^[34],因此,水力发电的耗水在此忽略。风力发电过程不需要消耗水资源,故设定此两种能源单位产量蓝水足迹值为0。综上,各能源生产蓝水足迹计算公式为

$$W_E = W_T + W_P \quad (1)$$

$$W_T = W_{cm} + W_{om} + W_{gm} + W_{pp} = f_{cm} \times p_{cm} + f_{om} \times p_{om} + f_{gm} \times p_{gm} + f_{pp} \times p_{pp} \quad (2)$$

$$W_P = W_{cs} + W_{cw} + W_{tp} + W_{ow} = f_{cs} \times p_{cs} + f_{cw} \times p_{cw} + f_{tp} \times p_{tp} + f_{ow} \times p_{ow} \quad (3)$$

式中: W_E 、 W_T 、 W_P 、 W_{cm} 、 W_{om} 、 W_{gm} 、 W_{pp} 、 W_{cs} 、 W_{cw} 、 W_{tp} 、 W_{ow} 分别为能源生产、能源开采、能源加工、原煤开采、原油开采、天然气开采、光伏发电、原煤洗选、炼焦过程、火力发电以及原油加工的蓝水足迹, m³; f_{cm} 、 f_{om} 、 f_{cs} 、 f_{cw} 、 f_{ow} 分别为原煤开采、原油开采、原煤洗选、炼焦、原油加工过程中的单位产量蓝水足迹值, m³/t; f_{gm} 为天然气开采过程中的单位产量蓝水足迹值, m³/万m³; f_{tp} 、 f_{pp} 为火力发电以及光伏发电过程中的单位产量蓝水足迹值, m³/(MW·h); p_{cm} 、 p_{om} 、 p_{cs} 、 p_{cw} 、 p_{ow} 分别为原煤产量、原油产量、原煤洗选量、焦炭产量、原油加工量, t; p_{gm} 为天然气产量, 万m³; p_{tp} 、 p_{pp} 为火力发电量、光伏发电量, MW·h。

2.2 数据来源

选取河南、山西、内蒙古、陕西、宁夏、甘肃、青海7省42个地级市(州、盟)为研究对象,收集了1990年、1995年、2000年、2005年、2010年、2015年、2020年7期原煤开采量、原油开采量、天然气开采量、煤炭洗选量、焦炭产量、原油加工量、火力发电量、水力发电量以及风能和光伏发电量数据。以上能源产量数据来自《中国能源统计年鉴》以及各省市统计年鉴,对于缺失数据采用线性插值法进行补充。各省区能源单位产量蓝水足迹值来源于各省历年发布的《行业用水定额》,即某一技术在某一时期、某一地区的取水导纳和超前取水强度,反映了特定技术在某一时期、某一地区取水水平的

有效指标^[35]。各省各能源单位产量蓝水足迹值有领跑值、先进值以及通用值,取三者的平均值作为各能源单位产量蓝水足迹值,见表 1。

表 1 黄河上中游各省区能源单位产量蓝水足迹值

Tab. 1 Blue water footprint values of energy unit production in the upper and middle reaches of the Yellow River in various provinces

省区	阶段	原煤开采/ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	洗煤/ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	炼焦/ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	原油开采/ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	原油加工/ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	天然气开采/ ($\text{m}^3 \cdot \text{万 m}^{-3}$)	火力发电/ [$\text{m}^3 \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}$]	光伏发电/ [$\text{m}^3 \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}$]
河南	1990—2008	0.900	0.700	3.000	4.500	2.500	0.200	2.405	
	2009—2014	0.250	0.100	2.500	3.100	0.945	0.200	1.530	
	2015—2020	0.220	0.065	1.600	3.100	0.500	0.200	0.968	0.180
山西	1990—2007	0.900	0.700	5.800	4.000		0.200	2.630	
	2008—2014	0.250	0.100	1.300	4.000		0.200	2.272	
	2015—2020	0.220	0.060	1.200	0.600		0.200	1.750	0.180
内蒙古	1990—2008	0.900	2.500	5.800	4.000	3.500	0.200	2.630	
	2009—2015	0.250	0.135	1.050	1.100	3.500	0.200	2.272	
	2016—2020	0.200	0.135	0.925	1.100	3.500	0.200	1.750	0.180
陕西	1990—2014	1.000	0.700	5.800	4.000	2.500	4.000	4.300	
	2015—2020	0.200	0.100	2.750	3.500	0.945	0.200	1.743	0.180
青海	1990—2008	1.500	1.000	5.800	4.500	2.750	0.150	2.630	
	2009—2015	0.350	0.150	3.500	2.000	1.600	0.150	2.630	0.180
	2016—2020	0.300	0.150	3.000	1.750	0.675	0.150	1.743	0.180
宁夏	1990—2008	0.700	1.000	5.800	4.500	1.100	0.150	2.630	
	2009—2015	0.350	0.150	3.500	2.000	0.945	0.150	2.272	0.180
	2016—2020	0.300	0.100	3.000	1.750	0.700	0.150	1.750	0.180
甘肃	1990—2010	1.500	1.000	5.800	4.500	2.500	0.150	2.630	
	2011—2016	0.340	0.150	2.200	3.690	1.600	0.150	2.272	0.180
	2017—2020	0.300	0.150	1.730	3.000	0.700	0.150	1.360	0.180

3 结果与分析

3.1 黄河上中游地区能源产量时空变化特征

1990—2020 年黄河上中游一次能源(原煤、原油、天然气、水电以及风电和光伏发电)生产总量呈现上升趋势,从 1990 年的 1.5 亿 t 标准煤增加至 2020 年的 17.1 亿 t 标准煤,在全国一次能源生产总量的占比从 1990 年的 13.7% 增加至 2020 年 41%。生产总量变化趋势可以分为 3 个阶段:第一阶段(1990—2000 年)增速较慢,年均增速为 2.4%;第二阶段(2000—2010 年)增速快,年均为 19%;第三阶段(2010—2020 年)增速放慢,年均增速为 4.6%。在产量增加的同时,1990—2020 年黄河上中游一次能源生产集中度不断加强且生产重心呈现出由中游向上游移动的趋势。

1990—2020 年黄河上中游化石能源产量显著增长。原煤年均增速为 8.3% [图 1(a)],主要分为 3 个阶段:第一阶段为缓慢增长阶段(1990—2000 年),原煤产量由 1.9 亿 t 增加至 2.5 亿 t,全国占比从 18% 增至 28%,主产区集中在晋城、

晋中等山西省地市;第二阶段为快速增长阶段(2000—2010 年),区域能源生产规模扩张、产量迅速增加以满足国家消费需求,该阶段产量增至 14 亿 t,年均增速为 19%,占全国原煤产量的 41%,同时原煤生产空间格局改变,随着榆林和鄂尔多斯的煤田得到开发,生产重心逐步向西北移动;第三阶段为 2010—2020 年,黄河上中游原煤产量增速变缓,10 年间产量增加 7 亿 t,达到 21 亿 t,年均增速为 4.1%,占全国原煤产量的 54%。在空间上原煤生产更加集中,主要分布在鄂尔多斯、榆林、吕梁、晋城以及晋中。原油产量变化与原煤相似 [图 1(b)],30 年间产量由 216.11 万 t 增至 3 465 万 t,全国占比由 1.6% 增至 17.8%,主产区集中在延安、庆阳和榆林。区域天然气开采发展较晚但增长迅速。1990 年,黄河上中游天然气产量为 0.4 亿 m^3 [图 1(c)],仅占全国天然气总产量的 0.3%,而 2020 年黄河上中游天然气产量达 523.6 亿 m^3 ,全国占比增至 27.2%。天然气主产区在空间分布上与原煤产区相似,集中在榆林、鄂尔多斯以及山西部分地市。

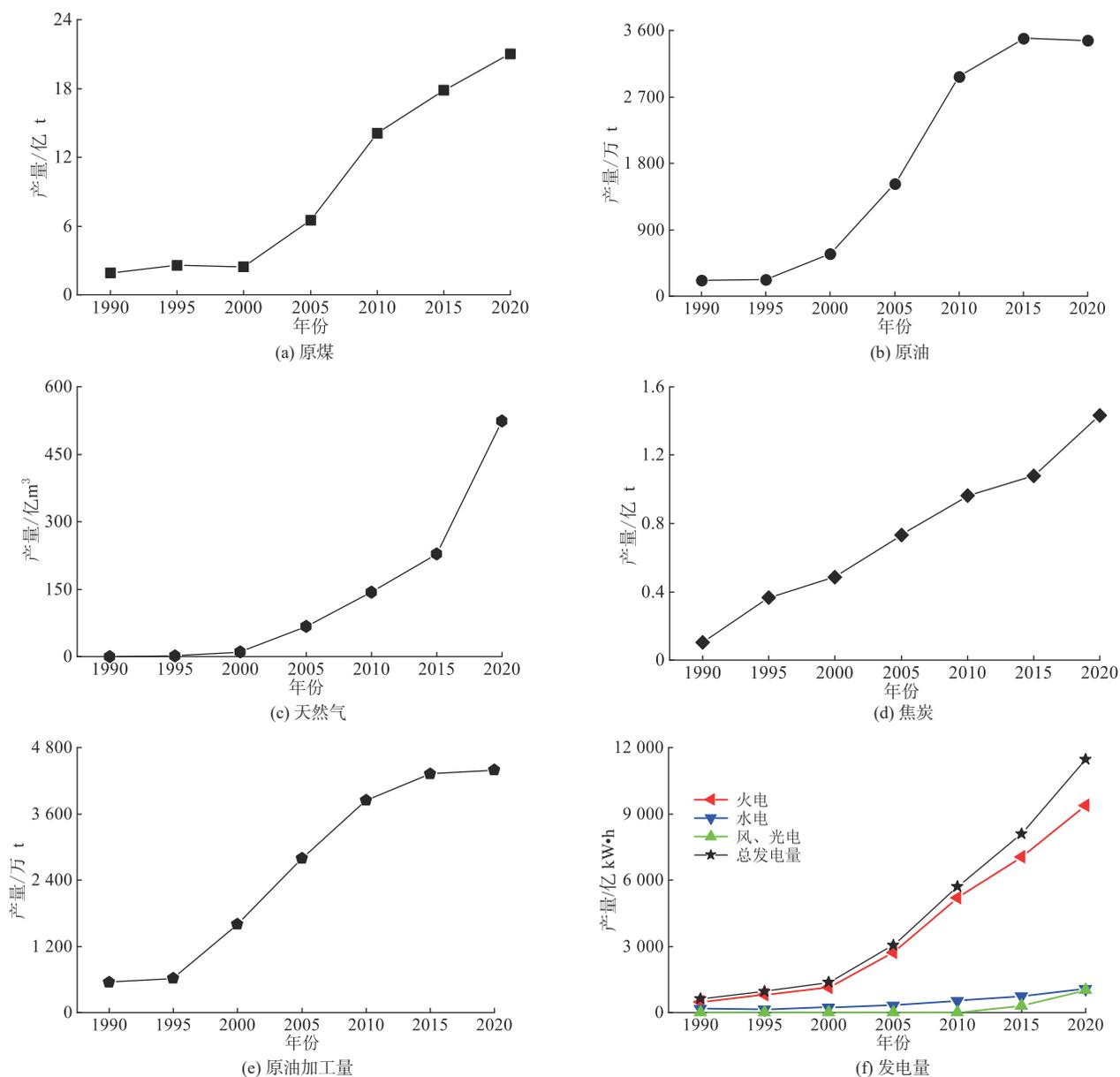


图1 1990—2020年黄河上中游分能源产量时间变化

Fig. 1 Time variation of energy production in the upper and middle reaches of the Yellow River from 1990 to 2020

黄河上中游能源加工量同样呈现快速增长趋势。焦炭产量从0.1亿t增至1.4亿t [图1(d)], 全国占比从14.0%增至30.4%, 生产重心主要分布在山西临汾、吕梁以及运城。原油加工量在1990—2020年从552万t增至4397万t [图1(e)], 生产重心与原油主产地相近。近30年黄河上中游总发电量由632亿kW·h增长至11463亿kW·h [图1(f)], 全国占比增至15.5%, 同时电力结构更加丰富, 由火电和水电转变为火电、水电和风、光电组合。其中, 火力发电是黄河上中游的主要发电类型。1990—2020年, 火力发电量由467亿kW·h增至9361亿kW·h, 在区域总发电量中的比重从73.9%增加至81.7%。火力发电量较高区域主要分布在鄂尔多斯、陕北、神东、晋北、晋中等地。在清洁能源

方面, 区域水力发电量由165亿kW·h增长至1083亿kW·h, 但在总发电量的比重由26.1%降至9.3%, 主要集中在兰州以上。而风、光电起步较晚, 在2010年之后迅速发展, 并在2020年发电量增至1019亿kW·h, 高值区集中在黄河“几字弯”附近和上游海南州。

3.2 黄河上中游地区能源生产结构时空变化特征

1990—2020年, 原煤在黄河上中游地区能源生产结构中占据主要地位, 但占比呈现下降态势, 由93.30%降至88.03%。天然气在能源生产结构中的比重明显增长, 1990年仅为0.04%, 2020年增至4.08%。清洁能源(水电、光伏和风电)以及原油占一次能源总产量的比例略有增加, 1990年二

者占比分别为 4.55% 和 2.11%, 2020 年二者占比增至 4.98% 和 2.90%。从黄河上中游内的省区尺度来看, 原煤在山西、内蒙古的一次能源生产结构中的比重始终大于研究区, 在陕西的一次能源生产结构中的比重与研究区相近。宁夏、河南以及青海清洁能源占比明显上升, 30 年分别增加了 16.0%、30.5% 以及 41.8%, 2020 年达到 20.0%、33.5% 以及

97.3%。为进一步明晰黄河上中游一次能源生产结构的时空变化特征, 基于各市一次能源产量比重进行 K-means 聚类, 共分为 8 组: 原煤为主; 原煤主导、原油为辅; 原煤主导、清洁能源为辅; 清洁能源主导、原煤为辅; 清洁能源为主; 清洁能源原煤比重相当; 原油为主; 无能源产业。各组定义见表 2。

表 2 黄河上中游地市能源结构类型

Tab. 2 Energy structure types of cities in the upper and middle reaches of the Yellow River

类型	原煤占比	原油占比	天然气占比	清洁能源占比
原煤为主	>95			
原煤主导、原油为辅	>50	>35		
原煤主导、清洁能源为辅	>75			>20
清洁能源主导、原煤为辅	>25			>70
清洁能源为主				>95
清洁能源原煤比重相当	>50			>48
原油为主		>92		
无能源产业				

1990—2020 年, 生产结构以原煤为主的地市, 在研究区内的比重由 62% 降至 40%。其中: 洛阳、三门峡、呼和浩特、包头、兰州以及石嘴山市 6 个市能源生产结构由以原煤为主转换为原煤主导、清洁能源为辅; 焦作、白银以及海北 3 个市能源生产结构由以原煤为主转换为清洁能源、原煤比重相当;

巴彦淖尔能源生产结构由以原煤为主转换为以清洁能源为主。同时, 生产结构以清洁能源为主的地市, 在研究区内的比重由 12% 升至 26%(图 2)。以上结果表明, 黄河上中游流域在保障化石能源生产的基础上, 大力发展清洁能源, 增加了区域能源生产的多样性和可持续性。

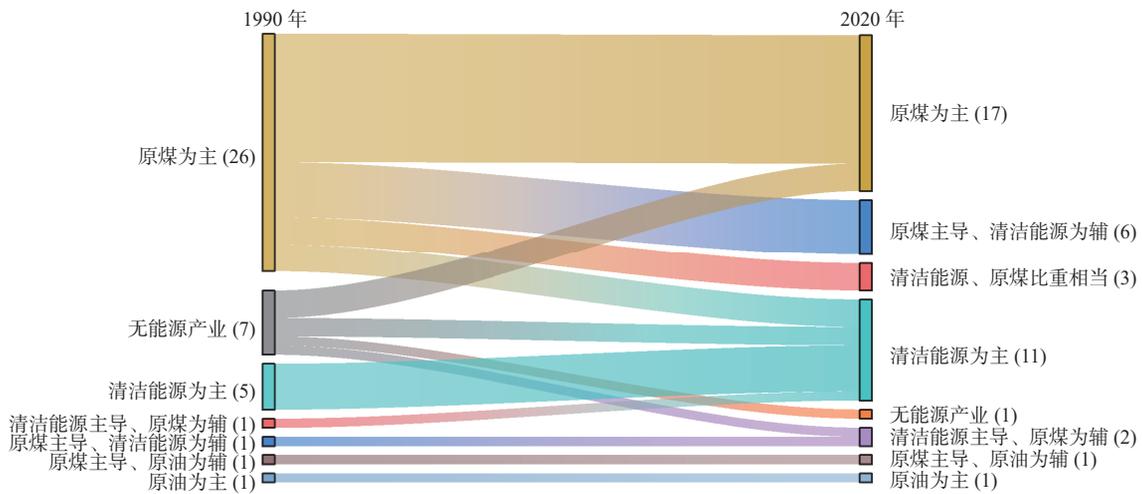


图 2 黄河上中游地市能源生产结构类型变化桑基图

Fig. 2 Sangji map of changes in energy production structure types in cities in the upper and middle reaches of the Yellow River

在空间上, 1990 年能源生产结构以原煤为主的地市主要分布在“几字弯”地区和甘肃各市, 但 2020 年分布范围缩小, 主要集中在黄河中游地区。2020 年能源生产结构以原油为主的地市与 1990 年变化不大, 均集中在庆阳和延安两地, 虽然铜川、巴彦淖尔和榆林成为新的产油区, 但原油在其能源生

产结构中的比重均低于 4.0%。2020 年 11 个天然气产区中, 延安市天然气产量占本市能源生产结构中最大为 12.7%, 其余 10 市占比均小于 8.0%。黄河上中游清洁能源生产范围迅速扩张, 区域在 1990 年共有 38% 的地市开发了清洁能源, 在 2020 年增至约 90%, 分布范围由黄河源区扩张至整个上游。整体

而言,黄河上中游能源生产结构在空间上呈现“中游化石能源、上游清洁能源”的分布格局。

3.3 黄河上中游地区能源生产水足迹变化特征

黄河上中游能源生产蓝水足迹由1990年的4.64亿 m^3 ,增加至2010年的最高值25.18亿 m^3 ,之后由于用水效率的提高,化石能源单位产量蓝水足迹值减小,同时,清洁能源比重的提升也使得能源生产的水足迹有所减少。因此,在产量增加的背景下,能源生产的蓝水足迹略有减少,至2020年为24.24亿 m^3 。黄河上中游能源开采蓝水足迹变化趋势与能源生产蓝水足迹变化趋势一致[图3(a)],由1990年的1.88亿 m^3 ,增加至2010年的最高值8.12亿 m^3 。能源开采蓝水足迹在能源生产蓝水足迹中的占比呈下降态势,由1990年的40.6%降至2020年的23.5%。原煤开采蓝水足迹是能源开采蓝水足

迹的主要组成部分,但占比同样呈现下降态势,1990年为95.0%,2020年降至77.3%。黄河上中游能源加工蓝水足迹呈增长态势[图3(b)],由1990年的2.75亿 m^3 ,增加至2020年的18.60亿 m^3 ,在能源生产蓝水足迹中的占比由1990年的59.4%增至2020年的76.5%。火力发电蓝水足迹在能源加工蓝水足迹中的比重持续上升,1990年为48.6%,2020年增至83.4%。

按不同能源的生产蓝水足迹变化[图3(c)]来看,煤炭开采与加工蓝水足迹是黄河上中游能源生产蓝水足迹中最大的组成部分,占比维持在90%以上。石油开采与加工蓝水足迹在1990为0.23亿 m^3 ,2010年达到最大值近2亿 m^3 ,之后呈现下降态势。天然气以及清洁能源生产蓝水足迹较少,2020年分别为0.007亿 m^3 和0.13亿 m^3 。

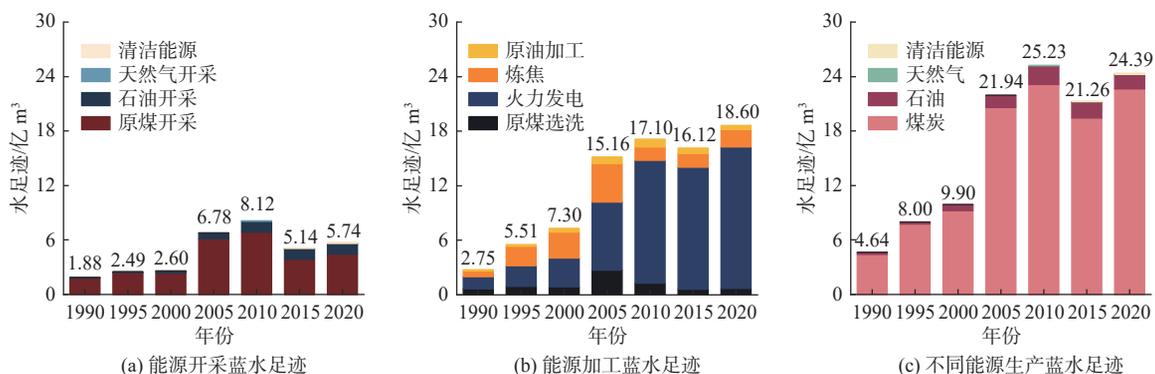


图3 1990—2020年黄河上中游能源生产蓝水足迹时间变化

Fig. 3 Changes in blue water footprint time of energy production in the upper and middle reaches of the Yellow River from 1990 to 2020

黄河上中游能源生产蓝水足迹高值区在空间上呈现聚集现象。研究初期黄河上中游能源生产蓝水足迹总量普遍较低,山西各州市(不包括运城)及中下游交界的河南焦作、三门峡以及上游的甘肃兰州是能源生产蓝水足迹总量相对较多的地市,均超过0.2亿 m^3 。2010年黄河上中游能源生产蓝水足迹高值区向上游靠近,其中,鄂尔多斯、榆林、延安、咸阳以及渭南能源生产蓝水足迹均超过1亿 m^3 ,占总量的47.2%。2020年能源生产蓝水足迹高值区位于黄河“几字弯”附近,包括吕梁、呼和浩特、包头、鄂尔多斯、榆林以及银川,占总量的52.7%。2020年黄河上中游内的青海、河南以及甘肃各市能源生产蓝水足迹总和分别为0.18亿 m^3 、0.97亿 m^3 、1.04亿 m^3 ,3市共占黄河上中游能源生产蓝水足迹的9.0%。1990—2020年,黄河上中游能源开采蓝水足迹的高值区由河南三门峡以及山西晋中、晋城、临汾等地市,流动到陕西榆林、延安以及内蒙古鄂尔

多斯。2020年,榆林、延安、鄂尔多斯能源开采蓝水足迹分别为1.42亿、0.63亿、1.32亿 m^3 ,共计3.37亿 m^3 ,三市总和在黄河上中游能源开采蓝水足迹总量中占比为58.7%。2020年,黄河上中游20%的地市能源开采蓝水足迹低于1990年。能源加工蓝水足迹相比能源开采蓝水足迹,高值区较多,分布较为分散。2020年高值区主要分布于鄂尔多斯、榆林、银川、包头以及呼和浩特,分别为2.5亿、2.1亿、1.78亿、1.23亿以及1.02亿 m^3 ,共8.63亿 m^3 ,在能源加工蓝水足迹总量中占比为58.7%。

4 讨论

水资源是保障能源供应的稳定性及安全性的基础。黄河流域虽具有丰富的能源资源,水资源短缺问题比较突出^[6],因此定量分析流域能源生产及其蓝水足迹的时空变化对保障区域乃至全国的能源安全以及能-水的协同发展至关重要。不同于已有

基于省区尺度的研究,在地级市尺度上开展,更能体现出黄河流域的特点,将为未来的流域水资源配置与水-能-粮协同发展提供支撑。郝帅等^[16]计算了全国原煤开采和选洗的蓝水足迹量,因其能源单位产量蓝水足迹值采用的国家标准高于省区级标准,因此其计算结果高于本研究。Chen 等^[36]计算了北方 8 个省的火电蓝水足迹,火电蓝水足迹高于本研究中的计算结果,但变化特征一致。受研究区范围和用水定额标准影响,上述研究的计算结果均大于本研究,但变化趋势相近。因此,本研究结果具有合理性,且在空间尺度上更精细。

1990—2020 年黄河上中游能源生产蓝水足迹整体呈增加趋势。在黄河流域可用水资源受限的背景下,降低能源单位产量蓝水足迹、提高用水效率是能源生产用水减量的关键。同时,优化能源生产结构,降低火电在电力结构中的比重也是解决该区域“能-水”矛盾的重要途径。在电力安全保供、充分发挥煤电的基础保障性和系统调节性的前提下,推动黄河上游、黄河“几字弯”大型风电、太阳能发电基地的建设,提升清洁能源在能源生产结构中的比重,可有效减少能源生产用水,进而缓解区域水资源紧张的压力。因此,未来应基于能-水关系开展黄河上中游能源结构优化研究,有利于增强黄河上中游地区能源供应的稳定性和安全性,提升能源生产的水资源利用效率。

5 结论

本文计算分析了 1990—2020 年黄河上中游地区地市能源生产、结构变化特征及能源生产蓝水足迹的时空变化,研究结果对黄河上中游能源-水的可持续利用具有重要意义。主要结论如下:

黄河上中游地区在保障国家能源安全方面发挥着越来越重要的作用。一次能源生产总量总体呈现上升趋势,从 1990 年的 1.5 亿 t 标准煤增到 2020 年的 17.1 亿 t 标准煤,占全国产量的比重从 13.7% 增至 41.0%。二次能源火电、焦炭以及成品油产量呈现上升趋势。能源生产重心由中游山西向上中游交界处鄂尔多斯、榆林等地转移。

能源生产结构变化。1990—2020 年,原煤在黄河上中游能源生产结构中的比重呈下降态势,天然气产量占一次能源总产量的比重有较明显的增长。黄河上中游能源生产结构空间分布呈现“中游化石能源、上游清洁能源”的格局,清洁能源分布范围呈

扩大趋势。以原煤为主的地区数量明显下降,能源生产结构中清洁能源比重提升。

黄河上中游能源生产的蓝水足迹 1990 年为 4.64 亿 m^3 , 2010 年达到最高 25.18 亿 m^3 , 2020 年下降至 24.24 亿 m^3 。能源单位产量蓝水足迹减小使得在能源产量持续增加的背景下,蓝水足迹总量略有下降。相比能源开采蓝水足迹,能源加工蓝水足迹是能源生产蓝水足迹的主要组成部分,而火力发电是蓝水足迹最多的能源加工过程。空间上,能源生产蓝水足迹高值区向“几字弯”地区集中。

参考文献:

- [1] WU H J, ZENG X Y, ZHANG L, et al. Water-energy nexus embedded in coal supply chain of a coal-based city, China[J]. *Resources Policy*, 2023, 85: 3812-3812. DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.103812.
- [2] DING N, LIU J R, YANG J X, et al. Comparative life cycle assessment of regional electricity supplies in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2016, 119: 47-59. DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.07.010.
- [3] International Energy Agency. *World Energy Outlook 2016*. Paris: IEA, 2016.
- [4] 项目综合报告编写组.《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(11): 1-25. DOI: 10.12062/cpre.20201025.
- [5] 张茵, 王婷, 游进军, 等. 全国水-社会经济耦合协调时空演变及其障碍因子分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(1): 64-74. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.01.006.
- [6] 周成, 赵亚玲, 张旭红, 等. 黄河流域城市生态韧性与效率时空演化特征及协调发展分析[J]. *干旱区地理*, 2023, 46(9): 1514-1523. DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2022.633.
- [7] 赵菲菲, 张青青, 张宇, 等. 基于贝叶斯网络的黄河径流预测[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(3): 511-519. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0054.
- [8] 吴昌贤, 薄岩, 黄微尘, 等. 黄河干流生态流量赤字及其成因[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(4): 8-16. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0069.
- [9] 李跃红, 蒋晓辉, 张琳. 黄河流域水资源节约集约利用能力评价[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(4): 731-741. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0071.
- [10] 张金良, 曹智伟, 金鑫, 等. 黄河流域发展质量综合评估研究[J]. *水利学报*, 2021, 52(8): 917-926. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20201088.

- [11] 彭少明, 郑小康, 王煜, 等. 黄河流域水资源-能源-粮食的协同优化[J]. *水科学进展*, 2017, 28(5): 681-690. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.05.005.
- [12] 徐祥民, 孙喜雨. 流域绿色高质量发展及其环境法保障: “黄河流域发展会议”引发的思考[J]. *河南大学学报(社会科学版)*, 2022, 62(1): 35-41. DOI: 10.15991/j.cnki.411028.2022.01.004.
- [13] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade[J]. *Water Science & Technology*, 2002, 49(11): 203-209.
- [14] HUA E, WANG X, ENGEL B A, et al. The competitive relationship between food and energy production for water in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 247: 119103. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119103.
- [15] ZHANG Y, ZHANG H. Analysis of water ecological footprint in Guangxi based on ecosystem services[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(13): 4111-4124. DOI: 10.5846/stxb201209231344.
- [16] 郝帅, 孙才志. 水-能纽带关系下的中国省际煤炭水足迹测度及空间转移特征分析[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*: 1-10. DOI: 10.19760/j.ncwu.zk.2023064.
- [17] 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[J]. *生态学报*, 2022, 42(14): 5692-5707. DOI: 10.5846/stxb202109222653.
- [18] FANG D, CHEN B. Linkage analysis for the water-energy nexus of city[J]. *Applied Energy*, 2017, 189: 770-779. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.04.020.
- [19] LIU Y L, HEJAZI M, KYLE P, et al. Global and regional evaluation of energy for water[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(17): 9736-9745. DOI: 10.1021/acs.est.6b01065.
- [20] CHEN P, ALVARADO V, HSU S. Water energy nexus in city and hinterlands: Multi-regional physical input-output analysis for Hong Kong and South China[J]. *Applied Energy*, 2018, 225: 986-997. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.05.083.
- [21] WANG S, FATH B, CHEN B. Energy-water nexus under energy mix scenarios using input-output and ecological network analyses[J]. *Applied Energy*, 2019, 233: 827-839. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.10.056.
- [22] 刘雅婷, 王赛鸽, 陈彬. 基于投入产出分析的北京市虚拟水核算[J]. *生态学报*, 2018, 38(6): 1930-1940. DOI: 10.5846/stxb20161211254.
- [23] HERATH I, DEURER M, HORNE D, et al. The water footprint of hydroelectricity: A methodological comparison from a case study in New Zealand[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2011, 19(14): 1582-1589. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.05.007.
- [24] 曾萌, 张园园, 王红瑞, 等. 中国水-能源纽带关系双向消耗核算研究[J]. *水资源保护*, 2022, 38(5): 159-165. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2022.05.021.
- [25] XIE X M, JIANG X Y, ZHANG T T, et al. Study on impact of electricity production on regional water resource in China by water footprint[J]. *Renewable Energy*, 2020, 152: 165-178. DOI: 10.1016/j.renene.2020.01.025.
- [26] 孙才志, 靳春玉, 郝帅. 黄河流域水资源-能源-粮食纽带关系研究[J]. *人民黄河*, 2020, 42(9): 101-106. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2020.09.019.
- [27] 高甜, 杨肖丽. 黄河流域粮食与能源水足迹压力与绿色发展脱钩关系研究[J]. *节水灌溉*, 2021(10): 24-29.
- [28] 付金华, 董国栋, 周新平, 等. 鄂尔多斯盆地油气地质研究进展与勘探技术[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(3): 19-40. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2021.03.003.
- [29] 孙莉茹, 毕华兴, 马志瑾, 等. 1951—2020年黄河上中游径流变化特征及归因分析[J]. *北京林业大学学报*, 2024, 46(1): 82-92. DOI: 10.12171/j.1000-1522.20230077.
- [30] 谢遵党, 唐梅英, 王建利, 等. 双碳目标下黄河流域水土风光资源一体化开发模式研究[J]. *人民黄河*, 2022, 44(5): 5-9. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2022.05.002.
- [31] DING N, LIU J R, YANG J X, et al. Water footprints of energy sources in China: Exploring options to improve water efficiency[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 174: 1021-1031. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.10.273.
- [32] SARVER T, AL-QARAGHULI A, KAZMERSKI L. A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2013, 22: 698-733. DOI: 10.1016/j.rser.2012.12.065.
- [33] LIU J G, ZHAO D D, GERBENS-LEENES P W, et al. China's rising hydropower demand challenges water sector[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11446. DOI: 10.1038/srep11446.
- [34] 李雨琴, 张鹏鹏, 张力小, 等. 中国水-能-粮资源适配格局动态演化及其驱动因素[J]. *生态学报*, 2023, 43(21): 8985-8997. DOI: 10.20103/j.stxb.202207041902.
- [35] JIA C H, YAN P, LIU P, et al. Energy industrial water withdrawal under different energy development scenarios: A multi-regional approach and a case

study of China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 135: 110224. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110224.

[36] CHEN Q Y, AN T L, LU S B, et al. The water foot-

print of coal-fired electricity production and the virtual water flows associated with coal and electricity transportation in China[J]. *Energy Procedia*, 2019, 158: 3519-3527. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.917.

Energy production and water footprint changes in the upper and middle reaches of the Yellow River basin

GUO Yuanyuan^{1,2}, GUO Ying², LIU Fenggui¹, SHEN Yilin², LI Kaimei^{1,2}, SHEN Yanjun²

(1. College of Geosciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 2. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China)

Abstract: In the past, China's energy consumption continued to rise, making the stability and security of energy supply a top priority. Water resources were a limiting factor in energy production. Throughout the entire energy production cycle, such as in mining, processing, and conversion, water was essential. The total coal resources in the upper and middle reaches of the Yellow River accounted for 52.2% of the country's total, making it an important energy production region. However, the self-produced water quantity of the Yellow River was insufficient and decreasing, leading to tight competition for water resources among agriculture, energy, and ecology. The contradiction between water supply and demand was becoming increasingly prominent, and energy production faced a water crisis.

Based on historical energy statistical data, the changing characteristics of energy production and structure in the upper and middle reaches of the Yellow River were analyzed. The blue water footprint of energy production was estimated using the water footprint theory, including the blue water footprint of energy extraction and energy processing. Additionally, the impact of energy production on water resource utilization in the river basin was analyzed.

From 1990 to 2020, there was an overall upward trend in the total primary energy production in the upper and middle reaches of the Yellow River. It increased from 150 million tons of standard coal to 1.71 billion tons of standard coal. The proportion of national production increased from 13.7% to 41%, and secondary energy production also showed an upward trend. Energy production concentration has continuously strengthened, with a shift in focus towards upstream regions from the midstream. In the past, the energy structure has also transformed. From 1990 to 2020, the proportion of raw coal in the energy production structure of the upper and middle reaches of the Yellow River has shown a downward trend, while the proportion of natural gas production in primary energy output has significantly increased. There was no significant increase in the proportion of clean energy and crude oil in primary energy output. The spatial distribution of energy production structure in the upper and middle reaches of the Yellow River showed a pattern of "fossil energy in the midstream, clean energy in the upstream," with a widening range of clean energy distribution. The number of cities that primarily relied on raw coal had decreased, and the proportion of clean energy in their energy production structures had increased. The blue water footprint of energy production had increased significantly. It had increased from 464 million m³ in 1990 to 2518 million m³ in 2010. However, due to improvements in water use efficiency, the blue water footprint per unit of fossil energy production had decreased. At the same time, the increase in clean energy's share had also reduced the water footprint of energy production. Therefore, despite increasing production, the blue water footprint of energy production had slightly decreased to 2 424 million m³ in 2020.

Except for crude oil and hydropower, all other forms of energy production in the upper and middle reaches of the Yellow River had maintained an upward trend. The growth rate of the blue water footprint of energy production was slower than that of energy output. Compared to the blue water footprint of energy extraction, that of energy

(下转第 908 页)