

DOI:10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0020

张杰,郝春洋,刘海滢,等.基于用水总量的水-能源-粮食关系解析[J].南水北调与水利科技,2020,18(1):194-201. ZHANG J, HAO C F, LIU H Y, et al. Analysis of the relationship between water, energy and food based on total water consumption[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(1):194-201. (in Chinese)

基于用水总量的水-能源-粮食关系解析

张杰¹, 郝春洋², 刘海滢², 李海明¹, 仇亚琴²

(1. 天津科技大学 滨海地下水利用与保护研究室, 天津 300450;
2. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100078)

摘要:随着社会经济的的发展和人口的增加,我国能源和粮食需求持续增加,水资源短缺对其制约日益显现。为更深入地研究水资源、能源和粮食之间的关系,采用31个省、自治区、直辖市的实测统计并与定额推算相结合的方法,对能源开发利用和粮食生产种植的用水总量和过程进行分析。结果表明:2015年,煤炭开采洗选、火电行业、煤化工行业中的合成氨、炼焦行业的用水量分别占煤炭全生命周期用水量的2.9%~4.4%、90.4%~94.8%、1.5%~2.6%、0.8%~2.7%,煤炭全生命周期用水量合计达506.7亿~531.5亿m³,占工业用水总量的38.0%~39.8%;农田灌溉用水量占农业用水总量的87.7%,实际亩均灌溉用水量394 m³,单位粮食产量的用水量为543.3 m³。研究成果可为水、能源、粮食之间的关系提供参考。

关键词:水资源;煤炭;粮食;纽带关系;全生命周期;用水总量

中图分类号:TV213.9 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis of the relationship between water, energy and food based on total water consumption

ZHANG Jie¹, HAO Chunyang², LIU Haiying², LI Haiming¹, QIU Yaqin²

(1. Laboratory of Coastal Groundwater Utilization & Protection, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300450, China; 2. National Key Laboratory of Basin Water Cycle Simulation and Control, China Institute of Water Resources & Hydropower Research, Beijing 100078, China)

Abstract: Social-economic development and the increase of population escalated China's energy and food demand, while the shortage of water resources is gradually constrained. In order to further study the relationship between water resources, energy and food, this paper uses the method of actual measurement statistics of 31 provinces and combined with quota estimation to analyze the total water use and process of energy development and food production and planting. The results showed that in 2015, the water consumption of synthetic ammonia and coking industry in coal mining and washing, thermal power industry and coal chemical industry accounted for 2.9%~4.4%, 90.4%~94.8%, 1.5%~2.6%, 0.8%~2.7% of the total life cycle of coal, respectively. The total water consumption of coal has reached 506.7~531.5 billion m³, accounting for 38.0%~39.8% of the total industrial water consumption. The irrigation water consumption of farmland accounted for 87.7% of the total agricultural water use, the actual irrigation water consumption per mu was 394 m³, and the water consumption per unit of grain output was 543.3 m³/t. The research results can provide a reference for the water-energy-food link.

Key words: water resources; coal; food; nexus; full life cycle; water consumption

收稿日期:2019-05-22 修回日期:2019-07-17 网络出版时间:2019-08-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190812.1401.002.html>

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0404603);山西省水利厅重点项目(SXSSLT-SZYC-YJ-2017-01)

Funds: National Key Research and Development Program of China(2017YFC0404603); Key Project of Shanxi Provincial Water Resources Department(SXSSLT-SZYC-YJ-2017-01)

作者简介:张杰(1994—),女,天津人,主要从事水环境方面的研究。E-mail:348601415@qq.com

通信作者:郝春洋(1986—),男,山西人,高级工程师,博士,主要从事水循环方面研究。E-mail:andycho2004@126.com

水资源、能源与粮食不仅支撑人类的生存同时也是支撑社会发展的主要因素^[1]。社会发展、人口增加和气候变化等因素对水资源、能源和粮食之间的影响日益突出^[2]。目前各国对水资源、能源、粮食的相关研究还未成熟,研究大多集中在水-能源-粮食纽带关系的综合论述^[3-6],对于水-能源-粮食纽带关系研究的方法^[7-8],水资源、能源和粮食三者之间的协同关系^[9-11],利用虚拟水和水足迹^[12-14]的方法解决水-能源-粮食的系统风险。研究多集中在水与能源、水与粮食之间关系的改善,而能源和粮食作为用水大户,在以用水总量为基础的情况下,水、能源、粮食关系的研究相对较少。本文通过梳理水与煤炭、水与粮食之间用水量的关系,为研究水资源、能源和粮食之间的关系提供参考。

我国不仅是能源生产大国同时也是能源消费大国,能源的开发与利用不仅支撑了经济的高速发展,同时也为资源与环境带来了严峻的挑战^[15],其中煤炭为我国主要的能源供应。煤炭消费与水资源关系紧密,水资源不只受到煤炭消费全周期的显著影响,同时也将成为煤炭消费的重要制约因素。研究表明,煤炭为能源中用水大户^[16]。煤炭资源与水资源呈逆向分布^[17],大部分煤炭基地处于水资源供需矛盾比较突出的地区,当前水资源对煤炭基地的建设产生了严重制约^[18-19]。与此同时,我国也是人口大国,对于粮食的需求极高^[20]。水资源是影响粮食生产的主要因素,由于水资源分布不均,水土流失严重,工业和城镇用水的增长等因素对粮食用水具有一定影响^[21]。本文从水资源与煤炭和粮食两个方面研究了基于用水总量的水-能源-粮食之间的关系。根据煤炭的开采、运输、转化、利用等过程,分析不同环节的用水量,根据亩均灌溉用水量和单位粮食产量的用水量,分析水资源与粮食之间的纽带关系。并针对用水量较大的环节提出相应的节水措施。

1 全国水资源与能源、粮食概况

1.1 全国水资源使用情况

2015年我国用水量6 103.2亿 m³,其中农业用水总量3 852.2亿 m³,占总用水量的63.1%;工业用水总量1 334.5亿 m³,占总用水量的21.9%;生活用水总量为793.5亿 m³,占总用水量的13.0%;生态用水总量为122.7亿 m³,占总用水量的2.0%;我国2015年人均用水量为445.1 m³^[22]。

1.2 全国能源生产消费情况

2015年我国能源生产总量361 476.0万 t 标准

煤,其中原煤生产总量260 985.7万 t 标准煤^[22],占能源生产总量的72.2%;原油生产总量为30 725.5万 t 标准煤^[22],占能源生产总量的8.5%;天然气生产总量为17 350.9万 t 标准煤^[22],占能源生产总量的4.8%;水电、核电、风电生产总量为52 414.0万 t 标准煤,占能源生产总量的14.5%。

我国2015年能源消费总量为429 905.0万 t 标准煤,其中煤炭消费总量为273 849.5万 t 标准煤^[22],占能源消费总量的63.7%;石油消费总量为78 672.6万 t 标准煤^[22],占能源消费总量的18.3%;天然气消费总量25 364.4万 t 标准煤^[22],占能源消费总量5.9%;水电、核电、风电消费总量为52 018.5万 t 标准煤,占能源消费总量的12.1%。

煤炭的生产量和消费量均占能源生产和消费的主要地位,因此本文以煤炭为能源代表,对其全生命周期的用水量进行推算和分析。

1.3 全国粮食生产情况

我国2015年农作物总播种面积为16 682.9万 hm²,其中粮食播种面积占总播种面积的71.3%。我国2015年有效灌溉面积为6 587.3万 hm²。近10年来,我国粮食产量持续增加,2015年粮食产量为66 060.3万 t^[22]。

2 煤炭及粮食用水特点及定量分析

2.1 煤炭的全生命周期特点

煤炭资源作为我国主要的能源,具有明显的全生命周期性^[23-24]。广义的煤炭用水包含了煤炭开采、洗选、运输、加工转换、终端消费等各个环节对水资源的利用^[25]。狭义的煤炭用水是指煤炭开采洗选过程的取用水;煤炭开采过程中的矿井涌水是区域地下水资源的一部分,视为煤炭生产对地下水资源的开发和破坏单独分析,不计入煤炭开采洗选用水量。煤炭全生命周期的概念见图1。本文以广义的煤炭消费全过程进行研究。



图1 煤炭全生命周期概念

Fig.1 Map of coal life cycle concept

2.2 煤炭全生命周期用水分析

2.2.1 煤炭开采洗选用水过程

煤炭开采和洗选业的用水主要包括井工矿井开

采、露天煤矿开采、煤炭洗选加工、煤矿地面辅助生产用水以及煤炭企业生活等方面的用水^[26-27]。通过定额推算的方法计算出 2015 年煤炭开采洗选用水量,见表 1。

表 1 2015 年煤炭开采洗选的用水量

Tab. 1 Water consumption for coal mining and washing in 2015

省、自治区、直辖市	定额/(m ³ ·t ⁻¹)		2015 煤炭开采洗选量/亿 t	2015 用水量/亿 m ³	
	先进值	准入值		最小	最大
河北	0.68	0.93	0.74	0.51	0.69
山西	0.20	0.25	9.67	1.93	2.42
内蒙古	0.45	0.55	9.10	4.09	5.00
辽宁	0.31	0.56	0.48	0.15	0.27
吉林	0.40	1.20	0.26	0.11	0.32
黑龙江	0.90	1.30	0.66	0.59	0.85
江苏	0.15	0.75	0.19	0.03	0.14
安徽	0.40	0.70	1.34	0.54	0.94
福建	2.20	3.80	0.16	0.35	0.60
江西	0.50	0.75	0.23	0.11	0.17
山东	0.13	0.36	1.42	0.18	0.51
河南	1.30	2.45	1.36	1.77	3.33
湖南	0.30	0.40	0.36	0.11	0.14
广西		0.50	0.04		0.02
重庆	0.70	1.20	0.36	0.25	0.43
四川	0.70	1.00	0.64	0.45	0.64
贵州	0.23	1.10	1.72	0.40	1.89
云南	0.90	1.20	0.52	0.47	0.62
陕西	0.20	0.44	5.26	1.05	2.31
甘肃	0.30	0.34	0.44	0.13	0.15
青海	0.30	0.4	0.08	0.02	0.03
宁夏	0.70	1.00	0.80	0.56	0.80
新疆	0.49	0.60	1.52	0.75	0.91
合计				14.53	23.20

2.2.2 煤炭转化利用用水过程

根据《能源统计年鉴 2016》^[28]得到 2015 年各省、自治区、直辖市煤炭消费总量的实物量并计算得

到原煤消费总量为 47.7 亿 t,其中加工转换投入量为 37.2 亿 t,终端消费量为 10.6 亿 t,其中煤炭加工转换投入量是指用于发电、供热以及转化为焦炭、油气等的数量,煤炭的终端消费量是指煤炭用于除加工转换外其他用途,包括作为能源或者材料的数量。在煤炭的加工转换方面,火力发电占到 67.3%,炼焦占 22.8%,供热占 9.0%,见图 2。在煤炭的终端消费方面,工业占 94.6%,生活消费约占 2.4%,见图 3。在煤炭的工业终端消费中煤炭消费量较大的行业主要包括非金属矿物制品业、化学原料及化学制品制造业、黑色金属冶炼及压延加工业。

通过对以上内容的分析,煤炭的消费主要集中在工业消费,其中消费量最多的行业为火电行业、炼焦和煤化工行业,本文选取这 3 类行业进行分析,计算其用水量。

(1)火电企业用水特点。

随着我国工业的高速增长,火电工业已作为工业的第一用水大户,其用水量的增长速度已超过工业用水量的平均水平。火力发电行业的生产用水主要包括水汽循环系统用水、冷却系统用水、水力除灰排渣系统用水和供热系统用水等环节^[29]。

根据 2015 年水资源公报的数据^[30],全国直流火电行业用水量为 480.5 亿 m³,火力发电的用水情况见表 2。



图 2 煤炭加工转换结构

Fig. 2 Coal processing conversion structure

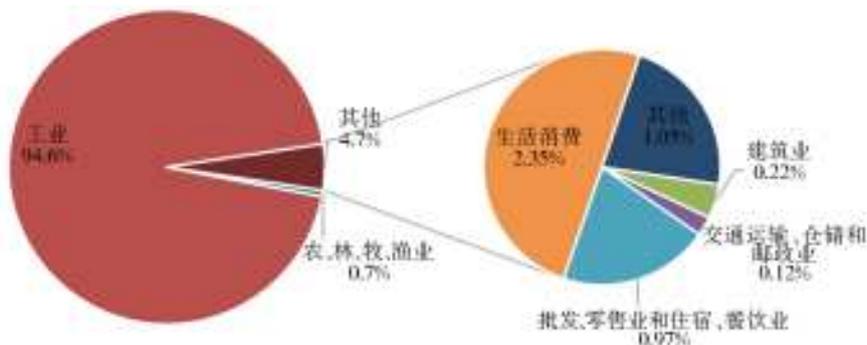


图 3 煤炭终端消费结构

Fig. 3 Coal terminal consumption structure

表2 2015年火力发电的用水量

Tab. 2 Water consumption of thermal power generation in 2015

省、自治区、直辖市	用水量/亿 m ³	省、自治区、直辖市	用水量/亿 m ³
河北	0.10	湖北	39.50
吉林	5.10	湖南	30.00
黑龙江	8.60	广东	36.60
上海	53.80	广西	20.50
江苏	189.90	重庆	5.40
浙江	1.00	四川	1.70
安徽	51.40	贵州	2.20
福建	12.30	云南	0.10
江西	16.80	合计	480.50
河南	5.70		

(2) 炼焦行业用水特点。

炼焦行业在传统煤化工的煤炭转化中占有较大比例。煤化工行业属高耗水产业,煤化工行业生产过程耗水量较大,主要用水项目包括:反应用水、用于加热的水蒸汽用水、生活用水、用于冷凝的冷却水、洗涤用水等^[31]。根据推算结果得到2015年炼焦行业的用水情况见表3。

表3 2015年炼焦行业的用水情况

Tab. 3 Water use in the coking industry in 2015

省、自治区、直辖市	定额/(m ³ ·t ⁻¹)		炼焦量/亿 t	用水量/亿 m ³	
	先进值	准入值		最小	最大
河北	0.80	1.00	0.74	0.59	0.74
山西	0.60	2.00	1.09	0.65	2.18
内蒙古	0.55	1.30	0.44	0.24	0.58
辽宁		1.85	0.29		0.54
吉林	0.20	25.00	0.05	0.01	1.17
黑龙江	0.20	27.00	0.10	0.02	2.71
江苏		1.20	0.33		0.40
安徽	0.75	3.50	0.13	0.10	0.45
福建	3.50	14.20	0.02	0.07	0.29
江西	0.75	3.00	0.11	0.08	0.34
山东		1.70	0.61		1.03
河南	1.60	1.92	0.35	0.57	0.68
湖北		3.60	0.13		0.47
湖南		2.50	0.09		0.23
重庆	1.20	2.00	0.03	0.04	0.06
贵州	2.98	3.50	0.10	0.30	0.36
陕西	2.50	3.00	0.58	1.46	1.75
甘肃	1.90	2.20	0.07	0.13	0.15
合计				4.27	14.12

(3) 其他煤化工行业用水特点。

表4为某化工公司煤化工产品产量及用水量^[32],通过对该公司的煤化工产品的单位产量的耗水量进行计算,其中煤制烯烃的单位产量的耗水量最多,其次是合成氨,由于用水定额中没有煤制烯烃的定额标准,因此以合成氨用水量为例进行推算,得到2015年合成氨用水量见表5。

表4 某化工公司煤化工产品产量及用水量

Tab. 4 Production and consumption of coal chemical products of a chemical company

产品	产量/(kt·a ⁻¹)	耗水量/(kt·a ⁻¹)	单位产量耗水量
甲醇	1 000	15 000	15
二甲醚	1 000	21 300	21.3
煤制烯烃	300	9 000	30
直接液化	300	2 000	6.7
合成氨	300	6 500	21.7

表5 2015年合成氨行业的用水情况

Tab. 5 Water use in the ammonia industry in 2015

省、自治区、直辖市	定额/(m ³ ·t ⁻¹)		合成氨/t	用水量/亿 m ³	
	先进值	准入值		最小	最大
河北	6.44	8.53	2 742 375	0.18	0.23
山西	9.45	11.03	5 358 801	0.51	0.59
内蒙古	7.00	8.00	1 240 268	0.09	0.10
辽宁	13.00	27.00	925 851	0.12	0.25
吉林	13.00	27.00	496 636	0.06	0.13
黑龙江	13.00	27.00	627 296	0.08	0.17
江苏	13.00	27.00	3 490 370	0.45	0.94
浙江	15.00	25.00	750 699	0.11	0.19
安徽	13.00	27.00	3 448 273	0.45	0.93
福建	40.00	70.00	872 313	0.35	0.61
山东	6.00	8.00	7 448 939	0.45	0.6
河南	12.00	18.00	6 302 466	0.76	1.13
湖北		27.00	4 880 171		1.32
湖南	13.00	27.00	1 060 038	0.14	0.29
广西	145.00	150.00	1 031 334	1.50	1.58
海南	14.00	22.00	791 569	0.11	0.17
重庆	13.00	22.00	2 162 284	0.29	0.52
四川	13.00	27.00	3 883 587	0.50	1.05
贵州	13.00	30.00	2 409 801	0.31	0.72
云南	31.50	45.00	2 374 790	0.75	1.07
陕西	8.00	10.00	1 901 613	0.15	0.19
甘肃	13.00	27.00	576 870	0.07	0.16
宁夏		27.00	646 877		0.17
新疆		27.00	2 181 732		0.59
合计				7.43	13.71

2.3 粮食用水特点及定量分析

水资源是粮食安全的主要影响因素^[33],粮食灌溉为农业用水的主要途径。2015 年粮食灌溉用水量占 87.7%,其中黑龙江省占比最高,为 96.9%,其次是湖南省和山西省,分别为 95.2%和 94.9%。31 个省、自治区、直辖市 2015 年灌溉水量占各自农业

用水量的比例见图 4。

2.3.1 亩均灌溉用水量

2015 年我国 31 个省、自治区、直辖市耕地实际灌溉亩均用水量为 394 亿 m³,农田灌溉水有效利用系数为 0.536^[30],耕地实际灌溉亩均用水量情况见表 6。

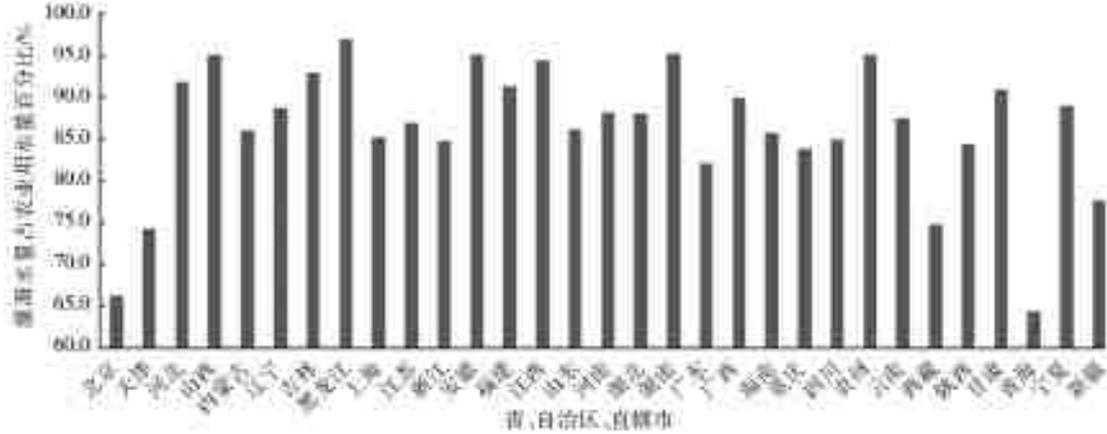


图 4 2015 年灌溉水量所占比例

Fig. 4 Proportion of irrigation water in various provinces and cities in 2015

表 6 2015 年耕地实际灌溉亩均用水量

Tab. 6 Total water consumption per mu of cultivated land in 2015

省、自治区、 直辖市	耕地实际灌溉亩均 用水量/亿 m ³	农田灌溉水有效 利用系数	省、自治区、 直辖市	耕地实际灌溉亩均 用水量/亿 m ³	农田灌溉水有效 利用系数
北京	227	0.71	湖北	430	0.50
天津	218	0.69	湖南	517	0.50
河北	213	0.67	广东	753	0.48
山西	186	0.53	广西壮族	873	0.47
内蒙古	327	0.52	海南	995	0.56
辽宁	389	0.59	重庆	339	0.48
吉林	351	0.56	四川	406	0.45
黑龙江	442	0.59	贵州	384	0.45
上海	431	0.74	云南	393	0.45
江苏	427	0.60	西藏	612	0.42
浙江	355	0.58	陕西	282	0.56
安徽	282	0.52	甘肃	497	0.54
福建	617	0.53	青海	565	0.49
江西	547	0.49	宁夏回族	753	0.50
山东	177	0.63	新疆	617	0.53
河南	165	0.61	合计	394	0.54

注:1 hm²=15 亩

2.3.2 单位粮食产量的用水量

根据灌溉用水量和 31 个省、自治区、直辖市的粮食产量计算得出单位粮食产量的用水量为 543.3 亿 m³。2015 年单位粮食产量的用水量见图 5。

3 讨论分析

3.1 煤炭全生命周期用水分析

本文以煤炭为例作为能源的研究对象,通过推算的方法计算出 2015 年煤炭全生命周期的用

供水总量的 53.3% 和 23.5%, 合计占比高达 76.8%。特别是在沿黄河套地区, 能源用水与粮食用水之间存在显著的相互竞争。此外, 鄂尔多斯地下水供水量占总供水量的比例接近 60%, 煤炭开采造成地下水流失、污染等问题, 进而影响到农业等用水安全, 也是水-能源-粮食关系的一个重要体现。

4 结 论

本文对以煤炭为代表的能源和粮食的用水总量进行分析, 对煤炭全生命周期的不同环节的用水量进行推算, 并计算单位粮食的用水量得出以下结论。

(1) 通过对煤炭和粮食全生命周期用水量进行分析, 结果表明: 煤炭全生命周期用水量占总用水量的 8.3%~8.7%, 其中火电行业用水量在煤炭全生命周期中用水量最多, 其次是煤炭开采洗选阶段; 煤炭全生命周期用水量最多的省份是江苏, 其次是安徽和上海; 农田灌溉用水量占总用水量的 55.3%, 其中用水量最多的是黑龙江, 其次是湖南和山西。煤炭和粮食合计用水量最多的是江苏, 其次是新疆和黑龙江。

(2) 水-能源-粮食关系的核心是水资源, 以鄂尔多斯为例进行分析, 结果表明: 能源开发利用与粮食灌溉的总用水量分别占该市供水总量的 53.3% 和 23.5%, 二者合计高达 76.8%; 特别是在沿黄河套地区, 为了满足能源发展用水, 当地采用水权转换、加强节水等手段, 协调能源、粮食之间的水资源竞争矛盾; 煤炭开发对地下水的破坏也对当地以地下水为主的水安全形势造成影响。

参考文献(References):

- [1] 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(5): 43-52. (PENG S M, ZHENG X K, WANG Y, et al. Collaborative optimization of water resources-energy-food in the Yellow River basin [J]. Progress in water science, 2017(5): 43-52. (in Chinese))
- [2] 詹贻琛, 吴岚, 王艺璇. 中美均面临水、能源、粮食三者冲突[J]. 中国经济报告, 2014(1): 109-111. (ZHAN Y C, WU L, WANG Y X. Both China and the United States face conflicts between water, energy and food [J]. China Economic Report, 2014(1): 109-111. (in Chinese))
- [3] 杨研, 金晨曦, 夏朋. “水-能源-粮食纽带关系”典型国家实践及启示[J]. 水利发展研究, 2019, 19(1): 78-81. (YANG Y, JIN C X, XIA P. Typical state practice and enlightenment of "water-energy-food link relationship"[J]. Water Resources Development Research, 2019, 19(1): 78-81. (in Chinese))
- [4] 常远, 夏朋, 王建平. 水-能源-粮食纽带关系概述及对我国的启示[J]. 水利发展研究, 2016, 16(5): 67-70.

- (CHANG Y, XIA P, WANG J P. An overview of water-energy-food ties and its implications for China[J]. Water Resources Development Research, 2016, 16(5): 67-70. (in Chinese))
- [5] KRAMPE U D I J, KREUZINGER M N. Water-energy-food-nexus[J]. Österreichische Wasser-und Abfallwirtschaft, 2016, 68(3): 1-2.
- [6] 郑人瑞, 唐金荣, 金玺. 水-能源-粮食纽带关系: 地球科学的认知与解决方案[J]. 中国矿业, 2018, 27(10): 39-44. (ZHENG R R, TANG J R, JIN X. Water-energy-food link relationship: Cognition and solution of earth science [J]. China Mining, 2018, 27(10): 39-44. (in Chinese))
- [7] ALBRECHT T R, CROOTOFF A, SCOTT C A. The water-energy-food nexus: A systematic review of methods for nexus assessment [J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(4).
- [8] ENDO A, TSURITA I, ORENCIO P M, et al. Concepts, tools/methods, and practices of water-energy-food NEXUS[C]. AGU Fall Meeting Abstracts, 2014.
- [9] 赖玉珮. 中国水-能源-粮食协同需求的区域特征研究[J]. 北京规划建设, 2019(1): 74-77. (LAI Y P. Regional characteristics of China's Water-energy-food synergy demand [J]. Beijing Planning and Construction, 2019(1): 74-77. (in Chinese))
- [10] 邓鹏, 陈菁, 陈丹, 等. 区域水-能源-粮食耦合协调演化特征研究——以江苏省为例[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(6): 232-238. (ZHENG P, CHEN J, CHEN D, et al. Study on coordinated evolution characteristics of regional water-energy-food coupling: Taking Jiangsu Province as an example [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(6): 232-238. (in Chinese))
- [11] RASUL G, NEUPANE N, HUSSAIN A, et al. Beyond hydropower: towards an integrated solution for water, energy and food security in south Asia[J]. International Journal of Water Resources Development, 2019, (1): 1-25.
- [12] ZHUO L, MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. The effect of inter-annual variability of consumption, production, trade and climate on crop-related green and blue water footprints and inter-regional virtual water trade: A study for China (1978-2008) [J]. Water Research, 2016, 94: 73-85.
- [13] 段佩利, 秦丽杰. 吉林省玉米生长过程水足迹研究[J]. 资源开发与市场, 2014, 30(7): 810-812. (DUAN P L, QIN L J. Study on water footprint of corn growth process in Jilin Province [J]. Resources Development and Market, 2014, 30(7): 810-812. (in Chinese))
- [14] VORA N, SHAH A, BILEC M M, et al. Food-energy-water nexus: quantifying embodied energy and GHG emissions from irrigation through virtual water transfers in food trade[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering,

- 2017,5(3):2119-2128.
- [15] 姜珊. 水-能源纽带关系解析与耦合模拟[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2017. (JIANG S. Water-energy ties analysis and coupling analogy [D]. Beijing:China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2017. (in Chinese))
- [16] 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(1):114-123. (XIANG X Z, JIA S F. Current demand water demand estimation and trend analysis of China's energy industry[J]. Journal of Natural Resources,2016(1):114-123. (in Chinese))
- [17] 郝春洋,仇亚琴,贾仰文,等. 浅议最严格水资源管理“三条红线”约束下的煤炭消费总量控制[J]. 世界环境,2015(2):25-27. (HAO C F, QIU Y Q, JIA Y W, et al. Discussion on total coal consumption control under the constraint of the "Three Red Lines" of the most strict water resources management[J]. World Environment,2015(2):25-27. (in Chinese))
- [18] 汪应宏,郭达志,张海荣,等. 我国煤炭资源势的空间分布及其应用[J]. 自然资源学报,2006,21(2):225-230. (WANG Y H, GUO D Z, ZHANG H R, et al. Spatial distribution of coal resource potential in China and its application[J]. Journal of Natural Resources,2006,21(2):225-230. (in Chinese))
- [19] 赵媛,于鹏. 我国煤炭资源空间流动的基本格局与流输通道[J]. 经济地理,2007,27(2):196-200. (ZHAO Y, YU P. The basic pattern and flowing channel of China's coal resource spatial flow [J]. Economic Geography,2007,27(2):196-200. (in Chinese))
- [20] 吴娟. 基于粮食安全的我国粮食储备体系优化研究[D]. 武汉:华中农业大学,2012. (WU J. Research on optimization of China's grain reserve system based on food security [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2012. (in Chinese))
- [21] 彭世彰,艾丽坤. 提高灌溉水利用系数,保障国家粮食安全与水安全[J]. 水资源保护,2012,28(3):79-82. (PENG S Z, AI L K. Improving the utilization coefficient of irrigation water to ensure national food security and water security[J]. Water Resources Protection,2012,28(3):79-82. (in Chinese))
- [22] 国家统计局[EB/OL]. <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>. (National Bureau of Statistics,<http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>. (in Chinese))
- [23] 王兰甫. 把握煤矿生命周期外向拓展相关多元[J]. 中国煤炭工业,2007(12):47-48. (WANG L F. Grasping the relevant diversification of coal mine life cycle outward expansion [J]. China Coal Industry,2007(12):47-48. (in Chinese))
- [24] 佟瑞鹏,翟亚兵,刘欣,等. 煤矿全生命周期粉尘健康损害评价方法[J]. 中国安全科学学报,2013,23(10):126. (TONG R P, ZHAI Y B, LIU X, et al. Evaluation method of dust health damage in coal mine life cycle [J]. China Safety Science Journal,2013,23(10):126. (in Chinese))
- [25] 安英莉. 煤炭全生命周期环境行为及其对土地资源的影响[D]. 徐州:中国矿业大学,2017. (AN Y L. Coal life cycle environmental behavior and its impact on land resources [D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2017. (in Chinese))
- [26] 常小强. 煤炭开采对地下水资源的影响分析[J]. 能源与节能,2016(10):98-99. (CHANG X Q. Analysis of the influence of coal mining on groundwater resources[J]. Energy and Energy Conservation,2016(10):98-99. (in Chinese))
- [27] 柴洪伟. 煤炭洗选对环境的影响[J]. 科技风,2013(2):228-228. (CHAI H W. The impact of coal washing on the environment [J]. Science and Technology,2013(2):228-228. (in Chinese))
- [28] 国家统计局工业交通统计司. 中国能源统计年鉴2016[M]. 北京:中国统计出版社,2018. (Department of Industrial Transportation Statistics, National Bureau of Statistics. China energy statistics yearbook 2016[M]. Beijing: China Statistics Press,2018. (in Chinese))
- [29] 任志宏,卢淑霞. 火力发电企业节水及用水量概念释义[J]. 工业计量,2018,28(2):68-70. (REN Z H, LU S X. Interpretation of the concept of water saving and water consumption in thermal power generation enterprises[J]. Industrial Measurement,2018,28(2):68-70. (in Chinese))
- [30] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2015. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China water resources bulletin [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press,2015. (in Chinese))
- [31] 何光太. 柴里炼焦煤选煤厂煤泥水处理的应用性研究[D]. 天津:天津大学,2016. (HE G T. Applied research on coal slurry treatment in Chaili Coking coal preparation plant [D]. Tianjin: Tianjin University,2016. (in Chinese))
- [32] 苗媛. 煤化工用水及废水处理分析[J]. 化肥工业,2014(4):50-52. (MIAO Y. Analysis of coal chemical water and wastewater treatment [J]. Chemical Fertilizer Industry,2014(4):50-52. (in Chinese))
- [33] 杨友军. 浅谈水资源胁迫下基于粮食安全的现代农业技术创新趋势及策略[J]. 农业科技与信息,2018,554(21):54-55. (YANG Y J. Talking about the trend and strategy of modern agricultural technology innovation based on food security under water resources stress [J]. Agricultural Science & Technology,2018,554(21):54-55. (in Chinese))
- [34] 佟长福. 鄂尔多斯市综合节水技术和需水量预测研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2011. (TONG C F. Comprehensive water saving technology and water demand prediction in Ordos City [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University,2011. (in Chinese))