

DOI: 10.5846/stxb201309232340

魏思策, 石磊. 基于水足迹理论的煤制油产业布局评价. 生态学报, 2015, 35(12): 4203-4214.

Wei S C, Shi L. The coal-oil industrial layout evaluation based on water footprint theory. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(12): 4203-4214.

基于水足迹理论的煤制油产业布局评价

魏思策¹, 石磊^{2,*}

¹ 清华大学, 化学工程系, 北京 100084

² 清华大学, 环境学院, 国家环境保护生态工业重点实验室, 北京 100084

摘要: 煤制油是我国应对石油危机的重要途径之一, 但其高耗水的特点使其备受争议。利用水足迹理论对全国五大煤炭基地 2015 年规划的煤制油产业进行了蓝水足迹和灰水足迹的测算, 分析了煤制油产业对这些区域水资源的耗用情况及冲击程度。结果显示, 神东、晋东和新疆伊犁 3 个基地的煤制油产业蓝水足迹超过了 1 亿 t、灰水足迹超过了 3 亿 t, 其中神东地区作为最大的煤制油产地两项数值分别达到 1.9 亿 t 和 4.1 亿 t 与当地水资源总量对比, 宁东地区煤制油耗水冲击最大, 占当地水资源总量的 28.2%; 新疆伊犁地区比例最小, 为 0.36%。通过对这 5 个煤炭基地以区域为尺度的水足迹结构分析和评价比较, 得出了两种煤制油工艺的水资源消耗差异, 并且为煤制油产业在五大基地的合理布局给出了依据, 与此同时为接下来煤制油产业的技术革新和流程优化也提出了相应的建议。

关键词: 水足迹; 煤制油; 生命周期; 煤炭基地

The coal-oil industrial layout evaluation based on water footprint theory

WEI Sice¹, SHI Lei^{2,*}

¹ Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

² State Environmental Protection Key Laboratory on Eco-industry, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: “The Water Footprint Concept” as introduced by Hoekstra (2002), indicates the consumption of water needed for the production of the goods and services in a certain period of time consumed by any of the known population (a country, a region or a person). The products and services referred here contain the necessary human food, all kinds of daily necessities, domestic water and environmental water. Green water, Blue water and Gray water are the three components of the water footprint. This can be used to reveal the water consumption in the process of industrial activity and provide scientific basis to manage and regulate water usage in industrial production activities. Coal Oil/CTL, also known as Coal Liquefaction, is short for the coal chemical technology of producing liquid fuels and chemical raw materials based on coal. There are usually two technical routes: Direct Coal-Oil and Indirect Coal-Oil. The Coal-Oil industry is a strategic choice for China to cope with the oil crisis. Due to the high water consumption, however, the industry brings about many controversies. Based on water footprint theory, we calculated the blue water footprints and gray water footprints of the planned coal-oil industries in the nation's five largest coal bases: Shendong, Jindong, Ningdong, Shanbei and Xinjiang Yili. The water footprint includes direct water footprint and life cycle water footprint. The former means the water footprint associated directly with the production while the latter means the water footprint in the whole production supply chain. As the coal-oil industry consumes large amounts of coal and power resources, so the water footprints in coal plant and thermal power plant are both considered in the life cycle water footprint. Thus, we not only calculated the power consumption of the thermal power plant and coal plant themselves but also took the coal consumption in thermal power plant into account. The results

基金项目: 水体污染控制与治理重大专项 (2012ZX07203-004, 2012ZX07301-005)

收稿日期: 2013-09-23; **网络出版日期:** 2014-07-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: slone@tsinghua.edu.cn

show that three out of five coal bases, Shendong, Jindong, and Xinjiang Yili have over 100 million tons of blue water footprint and their gray water footprint exceeded 300 million tons. Among them, for Shendong region as the largest coal-oil producer, these two values reached 190 million tons and 410 million tons respectively. From 2015 on, every year 7.26 million tons of oil is expected to be produced. Among the blue water and gray water footprints, the life cycle water footprint that includes coal and power resources water footprints accounted for nearly 50%. Therefore the life cycle water footprint has become a very important part of the water footprint. In addition the coal plant water footprint is much greater than thermal power plant. Compared with the local regional water resources, the utilization of water resources in Ningdong region is the largest (28.2%) and Xinjiang Yili region the smallest (0.36%). The results also show the regional average blue water and gray water footprints data of the coal-oil industry is basically the same: to produce 1 ton of oil the average blue water footprint is 20—26 tons while the gray water is 56—62 tons. All in all, the coal-oil industry layout planning should follow the principles of supply-side management and be based on local water resources and water environmental capability.

Key Words: water footprint; coal-oil; life cycle; coal base

随着石油资源的耗竭以及价格的不断攀升,煤制油技术成为缓解石油危机的重要措施之一,这对于“贫油、富煤”的我国尤其重要。然而,煤制油过程高耗水和高耗能的特点,使煤制油产业倍受争议。2008年,国家印发《关于加强煤制油项目管理有关问题的通知》,指出停止除示范工程以外所有的煤制油项目,旨在全面分析论证煤制油项目的可行性。针对煤制油高耗水争议,本文采用水足迹方法对我国五大煤炭基地煤制油项目开展研究,分析煤制油产业对这些区域水资源的利用情况及冲击程度。

水足迹的概念最早由 Hoekstra 界定,意指一个国家、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^[1]。因可以形象地表征出社会经济系统的发展对于水资源环境的压力,水足迹自提出后迅速推广应用到国家、省、市、区、流域等不同尺度,识别这些尺度上水足迹的规模变化、结构变化及其影响因素,为水资源安全、粮食安全及生态环境压力等问题提供决策支持^[2-6]。同时,因国际贸易所引致的虚拟水贸易问题,水足迹研究拓展到大米、玉米和小麦等农产品领域^[7-9],其后又进一步拓展到工业产品领域。近年来,开始出现对典型工业过程的水足迹研究,例如印染、钢铁和纺织等^[10-13]。

煤制油产业是一种替代石油资源的战略产业,早在 20 世纪 70 年代美国等发达国家就开展了开拓性的研究,南非等国家甚至建立了中试规模的装置^[14]。然而,由于资源禀赋的特异性和经济发展的巨大需求,煤制油的真正大规模产业化却很可能发生在我国。位于内蒙古鄂尔多斯的神华百万吨级直接液化煤制油示范装置是世界上第 1 个百万吨级的直接液化煤制油商业示范装置^[15],这标志着我国成为煤制油产业的核心国家。尤其进入“十二五”以来,我国正在建设和规划中的煤制油装置多达 15 套,总产能高达 2337 万 t。然而,我国的煤制油装置基本位于缺水地区,而其相对高耗水特征引发了巨大的产业发展争议。因此,开展煤制油产业的水足迹及其产业布局研究就显得尤为重要。

由于煤制油产业尚处在大规模产业化前期,煤制油产业的水足迹研究至今未见报道。考虑到正面临煤制油产业发展的关键时期,选取神东、晋东、宁东、陕北、新疆伊犁五大煤炭基地,通过搜集相关资料,一方面开展煤制油产业全周期耗水量的测算,指出水资源优化的关键流程环节和削减潜力;另一方面,通过分析煤制油产业对五大煤炭基地水资源利用和冲击的情况,为煤制油产业的布局提供依据。

1 研究对象和区域

1.1 煤制油

煤制油也称煤液化,是以煤炭为原料生产液体燃料和化工原料的煤化工技术的简称。通常有两种技术路线,直接液化和间接液化^[16]。

煤直接液化是煤在适当的温度和压力条件下,直接催化加氢裂化,使其降解和加氢转化为液体油品的工

艺过程,煤直接液化也称加氢液化。其生命周期图及具体生产工艺流程如图 1 中虚线框所示^[17]。煤直接液化技术国内外都进行了大量的技术研究,并建设了许多中试装置,位于内蒙古鄂尔多斯的神华百万吨级直接液化煤制油示范装置成为世界上第 1 个百万吨级的直接液化煤制油商业示范装置。

煤的间接液化以煤为原料先经气化制合成气($\text{CO}+\text{H}_2$),再在催化剂的作用下,经 F-T 合成生成烃类产品和化学品的过程。具体的工艺流程如图 1 实线框所示。间接液化在国外已有 70 多年历史,而我国是从 20 世纪 70 年代开始开展煤炭液化技术研究。2009 年 3 月 20 日,采用中科合成油公司技术的伊泰 16 万 t/a 煤间接液化项目正式产油成功。该项目采用的浆态床反应器、费托合成催化剂、油品精制和系统集成全部由我国自主研制。

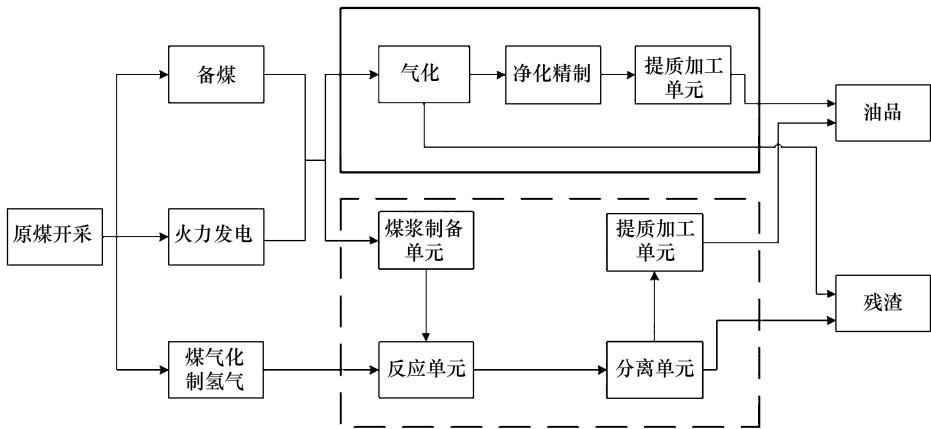


图 1 直接煤制油和间接煤制油生产工艺及生命周期流程示意图

Fig.1 The flow chart diagram and life cycle model of the direct coal-oil industry and indirect coal-oil industry

上图中实线框所表示的是间接煤制油流程,虚线框所表示的是直接煤制油流程

1.2 研究区域

本次研究的区域为国家“十二五”期间重点建设的 14 个煤炭基地中的 5 个,分别是神东、晋东、宁东、陕北和新疆基地,其中新疆基地的主要研究对象是伊犁地区。这 5 个基地的煤炭储量和水资源量如表 1 所示^[18-19]。

表 1 各煤炭基地的煤炭储量和水资源量^[18-19]
Table 1 Resources of coal and water in five coal bases^[18-19]

基地 Base	神东	晋东	宁东	陕北	新疆
煤炭储量 Coal Reserves/亿 t	2236	840	310	301	558
煤炭产量 Coal Production/亿 t	5.2	2.85	0.9	3	1
水资源量 Water Reserves/亿 t	29.22	24.6	3.2	48.4	360.67

2 研究方法和数据来源

2.1 水足迹计算方法

根据蓝水足迹的定义可知煤制油企业蓝水足迹(WFB)的计算公式^[20]为:

$$\text{WFB}=\text{WFB1}+\text{WFB2} \tag{1}$$

式中,WFB1 是运营蓝水足迹,即与产品生产直接相关的蓝水足迹,WBF2 是供应蓝水足迹,即与产品投入相关的供应链蓝水足迹^[21]。

针对本文所研究的煤制油、火电厂和采煤厂等企业,其企业灰水足迹的环境影响因子 $n_{k,m}$,来自单项排放浓度与相关标准对该项浓度限值 $c_{\text{限},k,m}$ 的比值:

$$n_{k,m} = c_{排,k,m}/c_{限,k,m}$$

(2)

在计算企业的灰水足迹时,应对各项污染物的环境影响因子逐一进行计算,最后选取最大值计算企业的灰水足迹:

$$WFBk = \max(n_{k,m}) Qk$$

(3)

当直排与纳管的浓度限值不同时,应当单独算出各自的灰水足迹再相加:

$$WFG = WFG1 + WFG2$$

(4)

企业灰水足迹可分为直排和纳管两部分,直排水和纳管水水质标准不同。直排水一般按地方污水综合排放标准,当地没有发布地方标准按《中华人民共和国污水综合排放标准》(GB8978—1996)。纳管水一般按照国家建设部发布的《污水排入城市下水道水质标准》(CJ343—2010),若存在地方或园区发布纳管水标准,则按照地方或园区标准为准。分别计算纳管水和直排水对应的灰水足迹再相加:

$$WF_{proc, grey} = \frac{c_1 \cdot D_1}{c_{直}} + \frac{c_2 \cdot D_2}{c_{纳}} + \frac{c_3 \cdot D_3}{c_{直}}$$

(5)

式中, c_1 为直排入水体的冷却水中对水体影响最大的污染物浓度(mg/L); D_1 为直排入水体的冷却水量(t); c_2 为经污水处理设施处理的纳管的排水中对水体影响最大的污染物浓度(mg/L); D_2 为经污水处理设施处理的纳管的排水量(t); c_3 为经污水处理设施处理的直排入水体的排水中对水体影响最大的污染物浓度(mg/L); D_3 为经污水处理设施处理的直排入水体的排水量(t); $c_{直}$ 根据该地域受纳水体水质级别对应的当地直排水污水综合排放标准规定的相应污染物浓度限值,若不存在地方标准,则根据《中华人民共和国污水综合排放标准》(GB8978—1996)中规定的相应限值(mg/L); $c_{纳}$ 为根据当地纳管污水综合排放标准规定的相应污染物浓度限值,若不存在地方标准,则根据《污水排入城市下水道水质标准》(CJ343—2010)中规定的相应限值(mg/L)。

2.2 数据来源

本研究采用的数据来源及用途如表 2 所示^[22-23]。

表 2 数据来源^[22-23]

Table 2 Data sources^[22-23]

数据用途 Data usage	数据项 Data items	具体数值 Specific values	数据来源 Data sources
蓝水足迹 Blue water footprint	直接煤制油电耗、水耗、煤耗	1180kWh、12t、3.3t	《中国煤制油发展现状与趋势分析》、企业官方报道、《煤电基地开发与水资源研究》
蓝水足迹 Blue water footprint	间接煤制油电耗、水耗、煤耗	820kWh、13t、3.64t	《中国煤制油发展现状与趋势分析》、企业报道
蓝水和灰水足迹 Blue and gray water footprint	火电厂自用电率	6.64%—6.72%	《火力发电厂厂用电设计技术规定》
蓝水足迹 Blue water footprint	采煤水耗	五大基地分别为 2.69 t 水/t 煤、1.44 t 水/t 煤、1.7 t 水/t 煤、1.8 t 水/t 煤、1.98 t 水/t 煤	《煤电基地开发与水资源研究》
蓝水和灰水足迹 Blue and gray water footprint	单位采煤耗电量	23.3—25.5 万 kWh/万 t	《2050 中国能源和低碳排放报告》
蓝水足迹 Blue water footprint	发电水耗	28 t 水/万 kWh	中国电力行业年度发展报告(2011 年)
蓝水和灰水足迹 Blue and gray water footprint	发电所需煤炭量	3.55 t 煤/万 kWh	能源发展“十二五”规划
蓝水和灰水足迹 Blue and gray water footprint	规划产量	五大基地为别为 736 万 t、561 万 t、400 万 t、100 万 t、540 万 t	国家及企业相关网站信息

续表			
数据用途 Data usage	数据项 Data items	具体数值 Specific values	数据来源 Data sources
蓝水足迹 Blue water footprint	地区多年平均水资源量	五大基地分别为 29.22 亿 t、24.60 亿 t、3.20 亿 t、48.40 亿 t、360.67 亿 t	《宁东能源化工基地水资源配置》、《内蒙古 2011 年水资源公报》、《山西省水资源公报 2008》、《2010 年陕西省水资源公报》
灰水足迹 Gray water footprint	煤制油废水排放量	分别为 4.4 t 废水/t 油和 5.64 t 废水/t 油	《煤电基地开发与水资源研究》及相关报道
灰水足迹 Gray water footprint	间接煤制油废水污染物浓度	COD、石油类、氨氮、硫化物、挥发酚等污染物的各项浓度	《煤制油高浓度废水处理工程设计》、《煤制油废水零排放实践与探索》
灰水足迹 Gray water footprint	直接煤制油废水污染物浓度	COD、石油类、氨氮、硫化物、挥发酚等污染物的各项浓度	《煤制油高浓度废水处理工程设计》、《煤制油废水零排放实践与探索》
灰水足迹 Gray water footprint	地表水质标准	COD、石油类、氨氮、硫化物、挥发酚等污染物的各项浓度	《地表水环境质量标准》
灰水足迹 Gray water footprint	处理后废水浓度	COD、石油类、氨氮、硫化物、挥发酚等污染物的各项浓度	污水排入城市下水道水质标准
灰水足迹 Gray water footprint	单位采煤废水排放量	1 t 水/t 煤	《煤矿废水控制与处理》曹宇
灰水足迹 Gray water footprint	单位发电废水排放量	8.75 t 水/万 kWh	发改委《火电行业节水现状、经验及存在问题》
灰水足迹 Gray water footprint	采煤厂废水污染物浓度	COD、石油类、氨氮、硫化物、挥发酚等污染物的各项浓度	《煤炭工业污染物排放标准》
灰水足迹 Gray water footprint	火电厂废水污染物浓度	COD、石油类、氨氮、硫化物、挥发酚等污染物的各项浓度	《污水综合排放标准》

3 结果与讨论

3.1 蓝水足迹

在生命周期理论的框架下,煤制油的蓝水足迹既包括与煤制油生产直接相关的蓝水,也包括与产品投入相关的供应链蓝水,即生命周期蓝水^[24-25]。

3.1.1 煤制油直接蓝水

两种煤制油技术的生产工艺差异比较大,因此对于各项资源的消耗值也各不相同。针对两种不同的煤制油技术,其生产 1 t 油品的运营蓝水足迹及相关资源消耗数据如图 2 所示。

由图 2 可知:

(1)直接煤制油和间接煤制油运营蓝水足迹分别为 12 t 和 13 t,运营蓝水足迹值均比较高,其中间接煤制油略高于直接煤制油。

(2)在其他资源消耗方面,直接煤制油生产单位油品需要耗电 1180kWh、耗煤 3.3 t,而间接煤制油需耗电 820kWh、耗煤 3.64 t,耗电量较少但耗煤量较多。

3.1.2 生命周期蓝水

生命周期蓝水以投入生产的煤炭资源和电力资源的蓝水为主,根据五大煤炭基地 2015 年煤制油产业的规划情况,各基地的生命周期蓝水足迹的具体计算数据

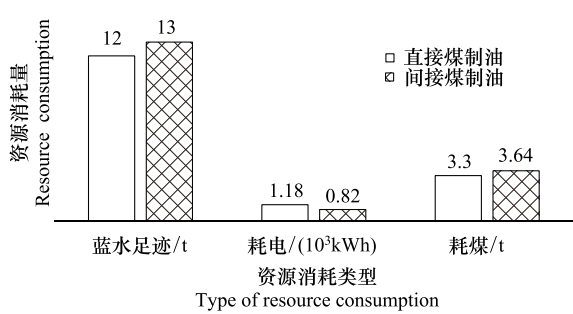


图 2 两种煤制油工艺运营蓝水足迹

Fig.2 Direct blue water footprint of two coal-oil technology 直接煤制油产业生产 1t 油品需要耗煤 3.3 t,其中包括原料煤 2.4 t,燃料煤 0.34 t,制氢煤 0.56 t

如附表 1 所示。根据煤制油技术的生命周期图(图 1),生命周期蓝水足迹计算将煤制油产业全周期的能耗、水耗全部考虑其中,其中煤炭资源的蓝水足迹包括采煤厂运营蓝水足迹及其耗电所产生的供应蓝水足迹,电力资源的蓝水足迹包括火电厂运营蓝水足迹及其耗煤、耗电所产生的供应蓝水足迹。

对比 5 个煤炭基地的生命周期蓝水足迹,神东地区的生命周期蓝水足迹量最大,其中直接煤制油达到 6737.31 万 t,而晋东地区生命周期蓝水足迹为 4751.38 万 t,其生命周期平均蓝水足迹分别为 13.47 t 和 8.47 t,相差 59%之多,这说明生命周期蓝水足迹与各基地其他工业部门耗水情况有较大关系;而神东地区直接煤制油和间接煤制油的生命周期平均蓝水足迹分别为 13.47 t 和 13.39 t,差异极小,可见两种煤制油技术的生命周期蓝水足迹基本相同。

此外,由结果可知,在煤制油的生命周期蓝水足迹中,采煤业的蓝水足迹占较大比例,而在整个煤制油产业中,电煤所只占不到 10%的比例,最主要的耗煤环节是煤制油的生产过程,因此生产耗煤的蓝水足迹是煤制油过程主要的水耗。

整合结果可知两种煤制油产业在五大基地总的蓝水足迹,具体数据如表 3 所示。

表 3 五大基地 2015 年煤制油总的蓝水足迹

Table 3 Total blue water footprint of five coal base in 2015

基地 Base	神东	晋东	宁东	陕北	新疆伊犁
间接煤制油水耗/万 t Water consumption of indirect coal-oil / ten thousand tons	3068	7293	5200	1300	7020
间接煤制油生命周期蓝水足迹/万 t Life cycle blue water footprint of indirect coal-oil/ten thousand tons	3160.67	4751.38	3816.59	990.51	5807.78
直接煤制油水耗/万 t Water consumption of direct coal-oil / ten thousand tons	6500				
直接煤制油生命周期蓝水足迹/万 t Life cycle blue water footprint of direct coal-oil/ten thousand tons	6737.31				
总蓝水足迹/万 t Total life cycle blue water footprint /ten thousand tons	18965.98	12044.38	9016.59	2290.51	12827.78
平均蓝水足迹/t The average blue water footprint/ton	25.71	20.96	21.98	22.37	23.08
地区多年平均水资源总量/亿 t Regional average water resources/ hundred million tons	29.22	24.60	3.20	48.40	360.67

由表 3 可知,2015 年煤制油产业在五大基地的总蓝水足迹分别为 1.9 亿 t、1.2 亿 t、0.9 亿 t、0.22 亿 t 和 1.29 亿 t,说明煤制油规划产量对总蓝水足迹起到决定性作用;而总蓝水足迹平均值分别为 25.71 t、20.96 t、21.98 t、22.37 t、23.08 t,说明不同基地各工业部门的用水情况对该地区煤制油产业水耗有很大影响。

在煤制油总的蓝水足迹中,生命周期蓝水约占总蓝水足迹的一半,可见生命周期蓝水是总蓝水中不可忽略的重要组成部分。基于对煤制油产业耗水量的计算,评价煤制油产业对当地水资源消耗情况需要与该地区水资源总量进行比对,从而得出煤制油产业对该区域水资源的耗用程度。煤制油耗水量占当地水资源总量的比例如图 3 所示。

由图 3 可知:

五大基地煤制油耗水占当地水资源量的比例分别为 6.49%、4.90%、28.18%、0.47%、0.36%,各地区比例差别较大,造成这样差异的原因一方面是因为水资源禀赋

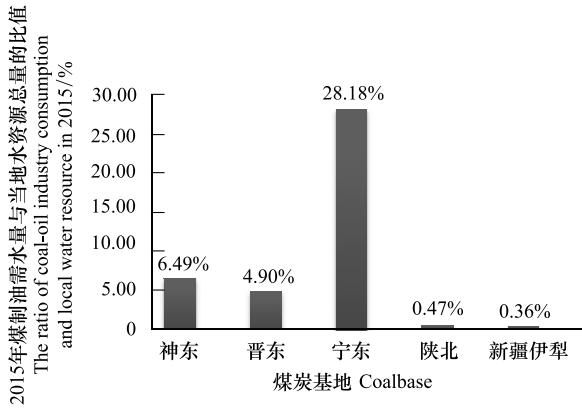


图 3 2015 年煤制油需水量与当地水资源总量的比值

Fig.3 The ratio of coal-oil industry consumption and local water resource in 2015

的不同,宁东地区水资源总量为 3.2 亿 t,而新疆伊犁水资源丰富,总量为 360.67 亿 t;另一方面是因为煤制油产业规模的不同,神东地区规划产量为 736 万 t,而陕北地区仅为 100 万 t。

总的来看,神东、晋东地区将是煤制油的主产区,该地区水资源量相对匮乏但蓝水消耗量较大,水足迹值高于其它几个地区;宁东地区水资源比较匮乏,同时煤制油规模较大,因此水足迹值相对水资源总量的比例高于其它几个地区;陕北地区煤制油产量较小,因此水足迹总量也比较小;新疆伊犁地区水资源量很充沛,煤制油产量大,因此水足迹总量也很大。

3.2 灰水足迹

在生命周期理论的框架下,煤制油的灰水足迹也包括两部分,分别是煤制油生产环节中直接排放的废水,还有与产品投入相关的废水,即生命周期灰水。

3.2.1 煤制油直接灰水

在煤制油的生产过程中会产生大量废水,针对两种不同的煤制油技术,它们各自的废水排放量如图 4 所示^[26-29]。

两种煤制油工艺的单位油品废水量分别为 4.4 t 和 5.64 t,相比之下间接煤制油工艺在生产过程中会产生更多的废水。煤制油产生的废水会全部进入污水处理厂进行综合处理,经过处理的废水中各项主要污染物浓度如附表 2 所示^[30]。

两种煤制油技术产生的废水中污染物浓度各不相同,但经过处理后以相同的浓度排出,且污水处理厂已经去除了废水中绝大部分的污染物。将污水处理厂排出的污染物浓度与地表水标准(五类)相比可以得到环

境影响因子,在各项污染物的环境影响因子中选取最大值 7.5 作为煤制油企业的灰水足迹。根据灰水足迹计算公式(公式 5)可知五大基地煤制油产业的直接灰水足迹,具体如表 4 所示。

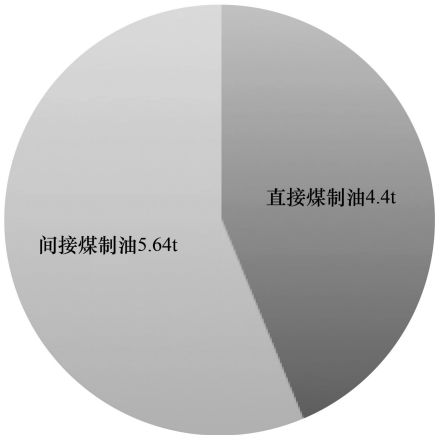


图 4 两种煤制油工艺的直接废水

Fig.4 Direct wastewater of two coal-oil technology

表 4 五大基地 2015 年煤制油产业的直接灰水足迹

Table 4 Direct gray water footprint of five coal bases in 2015

基地 Base	神东	晋东	宁东	陕北	新疆伊犁
间接煤制油废水排放量/万 t Indirect coal-oil waste water emissions/ten thousand tons	1331.04	3164.04	2256.00	564.00	3045.60
间接煤制油灰水足迹/万 t Indirect coal-oil Gray water footprint/ten thousand tons	9982.80	23730.30	16920.00	4230.00	22842.00
直接煤制油废水排放量/万 t Direct coal-oil waste water emissions/ten thousand tons	2220				
直接煤制油灰水足迹/万 t Direct coal-oil Gray water footprint/ten thousand tons	16650				
煤制油总的直接灰水足迹/万 t Total Gray water footprint/ten thousand tons	26632.8	23730.3	16920.0	4230.0	22842.0
平均灰水足迹/t The average gray water footprint/ton	36.68	42.3	42.3	42.3	42.3

由表 4 可知,煤制油总的直接灰水足迹值均超过当地总的蓝水足迹,其中神东地区灰水足迹达 2.66 亿 t,比总蓝水足迹多 40%。但其单位产量平均水足迹仅为 36.7 t,低于其他 4 个地区,这主要是因为该地区煤制油产业为两种技术共存,由表 9 可知直接煤制油废水排放量较少,故直接煤制油技术的灰水足迹要少于间接煤制油。

3.2.2 生命周期灰水

与生命周期蓝水类似,煤制油产业的生命周期灰水也是水足迹中非常重要的组成部分,主要包括火电厂和采煤厂的灰水足迹,具体废水中各主要污染物浓度及灰水足迹数如附表 3 所示^[31]。

将污水处理厂排出的污染物浓度与地表水标准(五类)相比可以得到环境影响因子,在各项污染物的环境影响因子中选取最大值 7.5 作为煤制油企业的生命周期灰水足迹,由此求得的五大基地 2015 年生命周期灰水足迹值如表 5 所示。

表 5 五大基地 2015 年生命周期灰水足迹
Table 5 Life cycle gray water footprint of five coal bases in 2015

基地 Base	神东	晋东	宁东	陕北	新疆伊犁
火电厂废水排放量/万 t Wastewater emissions of power plant/ten thousand tons	0.06	0.05	0.03	0.01	0.05
火电厂废水灰水足迹/万 t Power plant gray water footprint/ten thousand tons	0.47	0.36	0.26	0.06	0.35
采煤废水排放量/万 t Wastewater emissions of coal plant/ten thousand tons	2928.31	2229.67	1598.18	397.74	2182.67
采煤灰水足迹/万 t Coal plant gray water footprint/ten thousand tons	14641.55	11148.35	7990.90	1988.70	10913.35

各地区单位发电废水排放量 8.75 t/万 kWh;各地区单位采煤废水排放量 1 t。

由附表 3 可知,采煤厂和火电厂的废水影响因子分别是 5 和 7.5。从质的角度来说,采煤厂废水中各污染物浓度相比火电厂较低,其影响因子也显著低于火电厂,为后者的三分之二;从量的角度来说,采煤厂的废水排放量远高于火电厂的废水排放量,前者废水排放量约为后者的五万倍。综合来看,在生命周期灰水中,采煤厂的灰水足迹占据几乎所有比例,火电厂的灰水足迹甚至可忽略不计。

对比附表 3 与表 4 发现,生命周期灰水足迹的量已经接近部分区域甚至高于煤制油直接产生的灰水足迹的一半,可见生命周期灰水是煤制油产业灰水足迹中不可忽视的重要组成部分。五大基地煤制油产业全周期灰水足迹及平均灰水足迹分别如图 5 和图 6 所示。

由上图可知,各地区煤制油灰水足迹已超过当地煤制油蓝水足迹的两倍,其中神东地区以 4.1 亿 t 的量位居灰水足迹第一;而五大基地平均灰水足迹值分别为

56.08 t、62.17 t、62.28 t、62.19 t 和 62.51 t,神东地区灰水足迹平均值低于其他几个地区,主要原因是该地区规划的直接煤制油项目比间接煤制油的灰水足迹要少。

根据上述所有结果,可以绘出煤制油产业在每个地区的用水状况,如图 7 所示。

3.3 讨论

对比五大基地的煤制油产业用水状况可知,神东地区总蓝水足迹和总灰水足迹最大,分别高达 1.90 亿 t 和 4.13 亿 t;而晋东、宁东和新疆伊犁地区产业发展规模相似,其蓝水总量和灰水总量也趋于相同,从数量上看仅次于神东地区;陕北地区煤制油产业规模较小,故蓝水总量和灰水总量均显著低于其他地区,仅为 0.23 亿 t 和 0.62 亿 t。根据煤制油蓝水足迹与当地水资源量的比值可知,宁东地区的比例高达 28%;神东、晋东地区比例分别为 6.49%和 4.90%,相比宁东地区对水资源的影响要小;而陕北和新疆伊犁地区的比例均小于

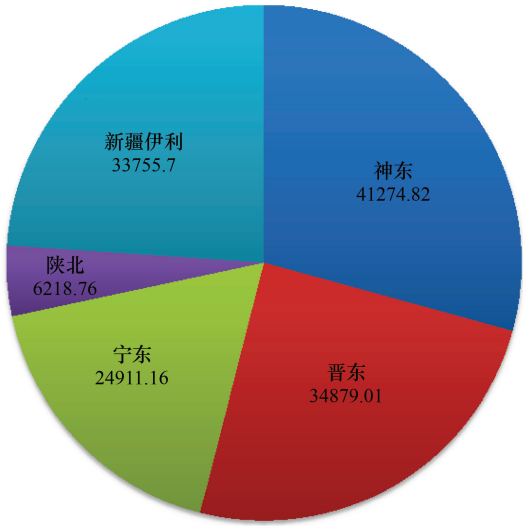


图 5 五大基地 2015 年煤制油产业总灰水足迹
Fig.5 Total gray water footprint of five coal bases in 2015

0.5%, 远低于其他 3 个地区, 说明该产业对当地水资源的影响程度甚微。

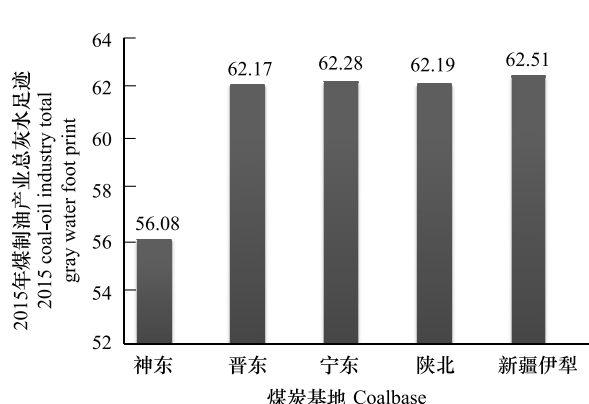


图6 五大基地2015年煤制油产业平均灰水足迹

Fig.6 The average gray water footprint of five coal bases in 2015

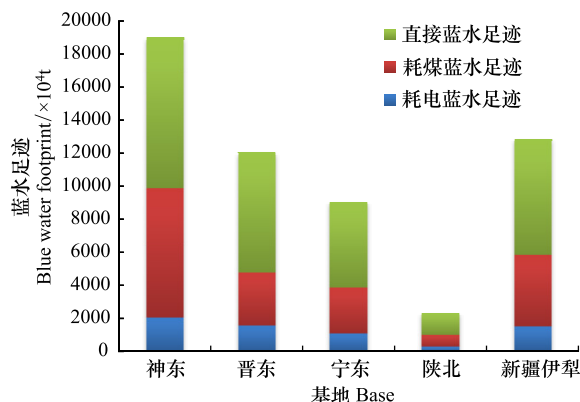


图7 各煤炭基地煤制油蓝水足迹

Fig.7 The blue water footprint of each coal base

对比两种煤制油工艺,从蓝水足迹的数据来看,两种工艺的新水消耗量基本相同,但从灰水足迹的数据来看,神东地区的平均灰水足迹低于其他几个地区,这主要是因为神东地区有大量的直接煤制油规划,由此可知,直接煤制油工艺的废水排放对环境的影响力低于间接煤制油,而两种工艺耗水量基本相同。

通过对这 5 个煤炭基地以区域为尺度的水足迹结构分析和评价比较,很直观的看出不同煤炭基地水资源受煤制油产业影响的程度差异非常大,煤制油产业占当地水资源总量的比例在宁东地区高达 28% 而在新疆伊犁则仅为 0.36%,因此单纯的从水资源的角度来说,新疆伊犁等水资源丰富的地区更适合煤制油产业的大规模布局,而水资源相对匮乏的地区则应遵循“以水定煤”的原则,适度开发煤制油产业,但可以综合利用水权置换、工业反哺农业等政策杠杆来调整工业用水配额,实现水资源的最优利用;与此同时,通过对煤制油产业全周期水足迹的测算,也可以看到生命周期水足迹占到总水足迹的一半以上,其中尤其以采煤业产生的水足迹为主,因此采煤业作为该产业流程中耗水量最大以及最有改善潜力的部分,应该是今后煤制油产业布局前需要予以特别关注的,无论是采煤业的技术革新还是流程优化,只要是有利于其减少水足迹的方法都将极大的促进煤制油产业的规模化生产。

本文中使用的办法是水足迹方法,在测算中主要考虑了煤制油直接生产、生产耗煤、生产耗电这三部分的水足迹,而其他各个方面的水足迹例如行政管理、运输等部分的水足迹因为难以测算且所占比例较小故未计入总水足迹中,因此本文测算出的水足迹数据并不能非常准确的表现真实的煤制油产业的水足迹数据,在下一步的研究中将进一步优化算法并获取更加准确的数据,通过理论数据与实际消耗的结合拟合出更加符合实际的测算公式。

4 结论

(1) 五大基地煤制油产业水足迹的分析结果表明,除陕北基地以外各地区煤制油蓝水足迹均接近或超过 1 亿 t、灰水足迹均超过 2 亿 t,煤制油作为一项高耗水产业,不仅其直接生产过程需要消耗大量新水并排出大量废水,而且生产所用的电力资源及煤炭资源对水资源也有很大的影响,其中生命周期蓝水约占蓝水总量的 50%,生命周期灰水约为总灰水足迹的三分之一,成为水足迹中不可忽略的重要组成部分。综合考虑直接和生命周期水足迹,煤制油生产一吨油品的平均蓝水和灰水足迹分别为 23 t 和 60 t 左右。

(2) 对比五大基地煤制油产业的蓝水、灰水足迹和水资源开发率等数据可知,宁东地区规划的煤制油规模偏大,水足迹值相对水资源总量的比例高于其它几个地区,高达 28.2%,对当地水资源的冲击较大;神东和晋东地区两地区的总规划量约 1300 万 t,蓝水足迹对水资源的利用率分别为 6.49% 和 4.90%,可以成为煤制

油产业适宜发展的区域;陕北地区煤制油产量较小,因此水足迹总量也比较小,蓝水、灰水足迹分别为 0.23 亿 t 和 0.62 亿 t;新疆伊犁地区煤制油产量很大,蓝水、灰水足迹总量分别达到 1.28 亿 t 和 3.37 亿 t,但因为该地区水资源量比较充沛,因此蓝水足迹占水资源总量的比例仅为 0.36%,对当地水资源的影响较小。

(3)通过测算可以明显的看到采煤业是煤制油产业流程中对水资源影响最大的模块,因此可以利用技术革新和流程优化等方法来减少其水足迹,从而间接的减少煤制油产业的水足迹;另外,通过对以上数据的整体分析,我们也可以知道在煤制油产业对当地水资源影响较小的地区更适合大规模发展煤制油产业,而在影响较大的地区则需要更加谨慎地进行规划,坚持“以水定煤”的原则,在规划之初做好整个煤化工园区的规划,以循环经济的理念协调上下游产业的关系,通过工艺内流程优化、园区内水资源循环利用、流域内水权置换等方式方法的结合,最终来实现煤制油产业水足迹的下降,促进其在各区域的大规模布局。

总的来说,各煤炭基地的煤制油项目在规划之初需要进行合理性和可行性分析,在保证做好水资源影响评估的基础上,进行科学的布局 and 规划。

参考文献 (References):

- [1] 尹婷婷,李恩超,侯红娟. 钢铁工业产品水足迹研究. 宝钢技术, 2012, (3): 25-28.
- [2] 高孟绪,任志远,郭斌,李小燕. 基于 GIS 的中国 2000 年水足迹省区差异分析. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 131-136.
- [3] 张义,张合平. 基于生态系统服务的广西水生态足迹分析. 生态学报, 2013, 33(13): 4111-4124.
- [4] 雷玉桃,高帅,卢丽华,吴里佳. 广州市水足迹的估算与分析. 特区经济, 2010, (8): 274-276.
- [5] Liu S L, Wang Y X, Mao X H. Calculation and analysis of water footprint in Shunyi district of Beijing. Applied Mechanics and Materials, 2013, 295-298: 964-969.
- [6] 蔡振华. 甘肃省及黑河流域水足迹及虚拟水贸易研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [7] 王会肖,蔡燕,王艳阳. 黄河流域农业水足迹研究 // 发挥资源科技优势 保障西部创新发展——中国自然资源学会 2011 年学术年会论文集 (下册). 北京市: 中国自然资源学会, 2011.
- [8] 田园宏,诸大建,王欢明,臧漫丹. 中国主要粮食作物的水足迹值: 1978-2010. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(6): 122-128.
- [9] Herath I, Green S, Singh R, Horne D, Van der Zijpp S, Clothier B. Water footprinting of agricultural products: A hydrological assessment for the water footprint of New Zealand's wines. Journal of Cleaner Production, 2013, 41: 232-243.
- [10] 张音,丁雪梅,吴雄英. 服装产品工业水足迹的若干基本问题. 印染, 2013, 39(7): 43-46.
- [11] Ene S A, Teodosiu C, Robu B, Volf I. Water footprint assessment in the winemaking industry: A case study for a romanian medium size production plant. Journal of Cleaner Production, 2013, 43: 122-135.
- [12] 王来力,吴雄英,丁雪梅,王丽华,于建明. 棉针织布的工业碳足迹和水足迹实例分析初探. 印染, 2012, 38(7): 43-46.
- [13] 石鑫. 新疆近 30 年棉花生产水足迹时空演变分析 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2012.
- [14] 杨葛灵. 中国神华煤制油发展战略研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2013.
- [15] 王涛. 中国煤制油产业法律规制 [D]. 太原: 山西财经大学, 2010.
- [16] 周丽,任相坤,张希良. 我国煤制油产业政策综述. 化工进展, 2012, 31(10): 2207-2212.
- [17] 马静,汪党献,来海亮,王茵. 中国区域水足迹的估算. 资源科学, 2005, 27(5): 96-100.
- [18] 中国科学院地理科学与资源研究所. 噬水之煤: 煤电基地开发与水资源研究. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [19] 国务院发改委《国家大型煤炭基地规划》, http://www.ndrc.gov.cn/xwfb/t20060428_67793.htm.
- [20] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, Mekonnen M M. 水足迹评价手册. 刘俊国,曾昭,赵乾斌,马坤,译. 北京: 科学出版社, 2012.
- [21] 徐长春,黄晶,刘继军, Ridoutt B G, 刘继军,陈阜. 基于生命周期评价的产品水足迹计算方法及案例分析. 自然资源学报, 2013, 28(5): 873-880.
- [22] 刘炳楠. 论陕北煤炭基地建设中的水资源问题. 陕西煤炭, 2005, 24(3): 3-6.
- [23] 冯洁. 宁东煤炭资源开采对地下水的影响研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2012.
- [24] 贾佳,严岩,王辰星,梁玉静,张亚君,吴钢,刘馨磊,王丽华,杜冲. 工业水足迹评价与应用. 生态学报, 2012, 32(20): 6558-6565.
- [25] 黄少良,杜冲,李伟群,王丽华. 工业水足迹理论与方法浅析. 生态经济, 2013, (1): 28-31.
- [26] 杨艳. 煤制油低浓度含油废水处理工艺研究 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2011.
- [27] 陈向前,孟昭福,单明军,陈凤. 石灰-铁盐法预处理煤制油废水的研究. 环境科学与技术, 2011, 34(8): 169-172.
- [28] 郝志明,郑伟,余关龙. 煤制油高浓度废水处理工程设计. 工业用水与废水, 2010, 41(3): 76-79.
- [29] 魏江波. 煤制油废水零排放实践与探索. 工业用水与废水, 2011, 42(5): 70-75.
- [30] Shao L, Chen G Q. Water footprint assessment for wastewater treatment: method, indicator, and application. Environmental Science & Technology, 2013, 47(14): 7787-7794.
- [31] 冯建国. 煤炭基地水污染及防治对策研究 [D]. 长安: 长安大学, 2007.

附表 1 2015 年煤制油在五大基地的生命周期蓝水足迹

Appendix 1 The life cycle blue water footprint of indirect coal-oil in five coal bases in 2015

基地 Base	神东(间接)	神东(直接)	晋东	宁东	陕北	新疆伊犁
规划产量/万 t	236	500	561	400	100	540
Production planning/ten thousand tons						
煤制油耗电/万 kWh	19.35	59.00	46.00	32.80	8.20	44.28
Power consumption of coal-oil/ten thousand kWh						
火电厂自用电率	6.64%	6.64%	6.67%	6.72%	6.65%	6.70%
Power consumption rate of thermal power plant itself						
生产耗煤/万 t	859.04	1650	2042.04	1456.00	364.00	1965.60
Coal consumption of production/ ten thousand tons						
单位采煤耗电量万度/万 t	23.30	23.30	24.10	25.50	24.00	25.30
Power consumption of coal plant ten thousand kWh/ ten thousand tons						
单位发电所需煤炭量 t/万 kWh	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55
Coal consumption of thermal power plant ton/ ten thousand kWh						
电力总消耗/万 kWh	23.13	49.04	55.02	39.27	9.81	53.07
Total power consumption /ten thousand kWh						
电煤消耗量/万 t	75.17	174.10	187.63	142.18	33.74	217.07
Power coal consumption/ ten thousand tons						
煤炭总消耗量/万 t	934.21	1994.10	2229.67	1598.18	397.74	2182.67
Total coal consumption /ten thousand tons						
单位发电需水量吨/万 kWh	28	28	28	28	28	28
Water consumption of thermal power plant ton/ ten thousand kWh						
耗电所需水/万 t	647.64	1373.18	1540.65	1099.70	274.59	1486.08
Water consumption of power/ten thousand tons						
单位采煤需水量/t	2.69	2.69	1.44	1.7	1.8	1.98
Water consumption of coal plant per ton / ton						
耗煤所需水/万 t	2513.03	5364.13	3210.72	2716.90	715.92	4321.70
Water consumption of coal/ten thousand tons						
生命周期蓝水足迹/万 t	3160.67	6737.31	4751.38	3816.59	990.51	5807.78
Life cycle blue water footprint/ten thousand tons						
生命周期平均蓝水足迹/t	13.39	13.47	8.47	9.54	9.91	10.76
The average life cycle blue water footprint/ten thousand tons						

附表 2 煤制油直接废水中各项污染物浓度

Appendix 2 Coal-oil direct wastewater pollutant concentration

污染物类别 Pollutant	地表水质标准(五类) Surface water quality standards(fifth level)	污水处理厂处理后废水 Concentration of treated wastewater	环境影响因子 Environmental Factors
COD/(mg /L)	40	60	1.5
石油类 Oil/(mg/L)	1	5	5
氨氮 Ammonia/(mg/L)	2	15	7.5
硫化物 Sulfide/(mg/L)	1	1	1
挥发酚 Volatile Phenol/(mg/L)	0.1	0.5	5
灰水足迹 Gray water footprint			7.5

附表 3 煤制油生命周期废水中各项污染物浓度

Appendix 3 Coal-oil life cycle wastewater pollutant concentration

污染物类别 Pollutant	地表水质 标准(五类) Surface water quality standards(fifth level)	煤矿采煤废水 Wastewater of coal plant	采煤废水环境 影响因子 Environmental Factors of coal wastewater	火电厂废水 Wastewater of thermal power plant	火电废水环境影响因子 Environmental Factors of power wastewater
COD/(mg/L)	40	50	1.25	60	1.5
石油类 Oil/(mg/L)	1	5	5	5	5
氨氮 Ammonia/(mg/L)	2		0	15	7.5
硫化物 Sulfide/(mg/L)	1	0.4	0.4	1	1
挥发酚 Volatile Phenol/(mg/L)	0.1	0.5	5	0.5	5
灰水足迹 Gray water footprint			5		7.5