

引用格式:关伟,赵湘宁,许淑婷.中国能源水足迹时空特征及其与水资源匹配关系[J].资源科学,2019,41(11):2008-2019.
[Guan W, Zhao X N, Xu S T. Spatiotemporal feature of the water footprint of energy and its relationship with water resources in China[J]. Resources Science, 2019, 41(11): 2008-2019.] DOI :10.18402/resci.2019.11.05

中国能源水足迹时空特征及其与水资源匹配关系

关伟^{1,2},赵湘宁¹,许淑婷²

(1. 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心,大连 116029;

2. 辽宁师范大学地理科学学院,大连 116029)

摘要:能源与水资源对人类生存和社会发展至关重要,能源水足迹能够反映能源生产过程中真实的水资源占用情况。本文借助能源水足迹评价模型测算中国30个省(市、自治区)化石能源和电力生产生命周期水足迹,研究2004—2016年中国原煤、原油、天然气、水电、火电5类能源水足迹时间和空间格局演化特征,分析中国能源水足迹与水资源空间匹配关系。结果表明:①在研究期内,化石能源水足迹以2012年为界先增后减,水电水足迹快速增长助推电力水足迹持续增长。②在空间格局上,化石能源水足迹以胡焕庸线为界西向增加东向减少,以蒙晋陕地区为高值集聚区;而电力水足迹中水电水足迹与火电水足迹的空间分界显著,水电水足迹的快速增长使长江流域、珠江流域及东南沿海逐渐形成电力水足迹高值集聚区。③能源水足迹与水资源的匹配程度以南高北低格局呈波动下降趋势,化石能源水足迹较电力水足迹与水资源的匹配度低,原煤生产与火力发电的能-水矛盾最突出,全国1/3的地区存在能-水不匹配问题,能源水足迹高的华北地区能-水匹配压力大。能源生产与水资源配置上的矛盾仍然存在。真实反映能源水足迹与水资源的匹配关系,有助于优化能源与水资源综合管理,为最大限度的发挥能-水协同作用提供量化依据。

关键词:能-水关联;能源水足迹;生命周期评价;水资源;空间匹配;绿色发展

DOI :10.18402/resci.2019.11.05

1 引言

能源和水资源二者相互依存、相互制约。中国城市化和工业化的不断推进促使能源消费量持续增长的同时,也加重了能源生产、加工、运输中水资源的消耗及污染,能源与水资源矛盾影响社会经济的可持续发展。能源水足迹作为表征能源生产、消费过程中的水资源占用、污染的重要指标,可以有效反映能-水关联问题。

能源水足迹的相关研究多集中在2010年后,且主要是对能源水足迹测算方法的研究,对其时空演变、影响因素等的研究较少^[1-3]。能源水足迹的测算分为自上而下和自下而上2种方法。现有研究中对能源水足迹的测算方法多为自上而下的方法,以货

币单位的能源消费计算各经济部门的能源水足迹,主要为投入产出方法^[4-7]。如Okadera等^[4]运用投入产出方法从能源消费的角度分析中国辽宁省的能源消费水足迹,并对其外部能源依赖性进行研究;Zhang等^[5]运用MRIO模型,基于消费的角度对中国能源生命周期用水、水消耗和废水排放进行分析。投入产出法的研究时间受限于国家投入产出表的编制年限,因此无法获取较近年份的数据,相比于此类方法,自下而上的方法因较近年份的数据更易获得,能更好地反映能源水足迹的现状。自下而上的方法是通过各类能源在生产和加工等过程中的实物量计算能源水足迹^[8-11]。如Okadera等^[8]从能源生产和供应的角度分别对泰国的能源水足迹进行

收稿日期:2019-03-19,修订日期:2019-07-27

基金项目:国家自然科学基金项目(41771132);辽宁省教育厅人文社会科学研究专项(H201783630);辽宁省社会科学规划基金项目(L18CJL002)。

作者简介:关伟,男,辽宁岫岩人,教授,博士生导师,研究方向为区域经济与产业规划。E-mail:lsgw2000@sina.com

2019年11月

测算;Scherer等^[9]对不同类型的水电部门水足迹进行评价;丁宁等^[12]从提高水资源效率的角度,基于ISO标准水足迹方法建立了能源水足迹评价模型,计算了中国全国和各省级一次能源及电力生产生命周期的水足迹。本文采用自下而上基于能源生产生命周期的能源水足迹评价模型^[12]测算能源水足迹,并对化石能源水足迹和电力水足迹进行对比分析,其中化石能源水足迹指代一次化石能源水足迹。

现有能源水足迹研究多为基于某一年份的截面数据,缺乏对能源水足迹时间和空间双重维度上的研究;其次,部分学者分析了能源水足迹对环境的影响,但忽略了对能源生产与水资源空间匹配关系的研究;此外,进行能源与水资源间的量化关联研究,对跨流域的能源-水安全问题具有重要意义。基于此,本文研究2004—2016年中国能源水足迹的时空特征,分析中国能源水足迹与水资源的空间匹配程度,旨在为能-水关系研究提供新视角,为协同能源与水资源区域能源转型发展提供量化依据。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 能源水足迹评价模型

能源水足迹评价模型是基于ISO标准水足迹方法^[13]建立的,从能源生产的生命周期出发,涵盖生命周期中采掘、处理、加工转化、使用、废弃物处理等的水足迹评价模型。引用能源水足迹评价模型对化石能源(原煤、原油、天然气)和电力(水力发电、火力发电)生产生命周期中的水足迹进行测算,水力发电和火力发电在本文简称为水电和火电。能源水足迹包括生产生命周期过程中的直接水足迹,以及生产过程中的材料和能源投入所带来的间接水足迹。由于能源生产生命周期中水污染的数据难以获取,能源生产导致的水污染状况用WFN水足迹方法中的灰水足迹^[14,15]表示。能源水足迹分为能源蓝水足迹和能源灰水足迹,能源蓝水足迹是生产过程中需要的来自于江河、湖泊及含水层中的地表径流与地下水,能源灰水足迹是生产过程中被污染的水稀释到排放标准所需要的水量。能源水足迹评价模型的公式为:

$$EPWF = PWF_{\text{direct}} + PWF_{\text{indirect}} = PWF_{b,d} + PWF_{g,d} + PWF_{b,in} + PWF_{g,in} \quad (1)$$

式中:EPWF指能源单位产量水足迹;PWF_{direct}指能源生产过程的直接单位产量水足迹;PWF_{indirect}指能源生产过程的间接单位产量水足迹;PWF_{b,d}指能源生产过程的直接单位产量蓝水足迹;PWF_{g,d}指能源生产过程的直接单位产量灰水足迹;PWF_{b,in}指能源投入的间接单位产量蓝水足迹;PWF_{g,in}指能源投入的间接单位产量灰水足迹。考虑到生命周期的所有过程,能源系统的水足迹应为各个生命周期阶段水足迹的加和,由以下公式表示:

$$EPWF = \sum_{m=1}^n (PWF_{m(b,d)} + PWF_{m(g,d)}) + \sum_{n=1}^n (PWF_{n(b,in)} + PWF_{n(g,in)}) \quad (2)$$

式中:m表示第m个生产过程;n表示第n类能源;其他变量含义同上。各能源单位产量灰色水足迹的计算公式如下:

$$PWF_{g,d} = \frac{L \times V}{C_{\max} - C_{\text{nat}}} = \frac{G}{C_{\max} - C_{\text{nat}}} \quad (3)$$

式中:L指单位能源生产废水排放量(m³/GJ);V指排放废水中污染物的量(mg/m³);G=L×V指单位能源生产的污染物排放量(mg/GJ);C_{max}指水中可接受的污染物浓度(mg/m³);C_{nat}指自然水的污染物浓度(mg/m³)。

能源水足迹 EWF 的计算公式如下:

$$EWF = \sum_{n=1}^n EWF_n = \sum_{n=1}^n (EPWF_n \times P_n) \quad (4)$$

式中:EWF_n指第n类能源水足迹;EPWF_n指第n类能源单位产量水足迹;P_n指第n类能源产量。

2.2 重心与标准差椭圆模型

利用重心距离和标准差椭圆的重合面积来分析能源水足迹与水资源在空间上的整体匹配程度。标准差椭圆的覆盖区域反映能源水足迹和水资源空间分布的主体地区,二者重心距离反映能源水足迹和水资源空间分布差异及整体匹配程度,重心距离越大,匹配程度越小,反之越大。计算公式为:

$$x = \sum_{i=1}^n G_{ij} x_i / \sum_{i=1}^n G_{ij}, y = \sum_{i=1}^n G_{ij} y_i / \sum_{i=1}^n G_{ij} \quad (5)$$

式中: (x,y) 为能源水足迹的重心坐标和可利用水资源量的重心坐标; n 为区域个数, $n=30$; (x_i,y_i) 为第 i 个区域空间权重的重心坐标; G_{ij} 为第 i 区域第 j 年的空间权重。

2.3 能源水足迹压力指数

为比较与分析不同地区能源水足迹与水资源的匹配程度,参考相关研究^[16-18]构建能源水足迹压力指数 F ,用来表示能源生产生命周期水足迹对水资源产生的压力,能源水足迹压力指数越大,能源水足迹与可利用水资源量的匹配程度越小。具体公式如下:

$$F_{ij} = \frac{EWF_{ij}}{Q_{ij}} \tag{6}$$

式中: F_{ij} 为 i 区域 j 年能源水足迹压力指数, EWF_{ij} 为 i 区域 j 年能源水足迹; Q_{ij} 为 i 区域 j 年可利用水资源量。

2.4 数据来源

本文选取 2004—2016 年数据分析中国 30 个省级行政区(西藏、香港、澳门、台湾因数据缺失未包含)能源水足迹的时空特征及其与水资源的匹配关

系。能源生产量来源于《中国能源统计年鉴》^[19],各能源平均低位发热量系数来源于 2017 年《中国能源统计年鉴》^[19]。各类型的能源生产生命周期中的单位产量水足迹值与数据来源如表 1 所示。在计算各能源单位产量灰色水足迹时,运用废水排放中的主要污染物化学需氧量 COD 作为计算能源灰水足迹的衡量指标。由于化石能源生产过程中的能耗计算较复杂,化石能源水足迹只计算化石能源直接水足迹。研究以可利用水资源量来表示各地区水资源现状,可利用水资源量按照水资源总量的 40% 计算^[18],水资源总量来源于《中国统计年鉴》^[20]。

原煤开采和洗选煤过程的废水 COD 量分别为 200 g/t 和 30 g/t^[21]。煤炭行业废水排放中可接受的最大 COD 值为 70 mg/L^[21]。原油开采过程中水资源的消耗定义为 7 m³/t^[23]。石油加工过程中的水消耗定义为 2.37 m³/t^[26]。天然气开采过程中钻井泥浆的用水定额为 30 m³/万 m³^[27]。天然气加工过程中净化装置单位生产水消耗量为 2.4 m³/万 m³^[29]。原油和天然气开采过程中的 COD 排放量数据来源于《中国环境统计年鉴》^[25],原油开采 COD 排放量为 821 mg/GJ,天然气开采 COD 排放量为 379 mg/GJ。石油炼

表 1 中国能源生产生命周期中单位产量水足迹值

Table 1 Water footprint value per unit of production in energy production life cycle in China

能源类型	分类	能源生产加工过程	各能源单位产量水足迹分类	能源单位产量水足迹值/(m ³ /GJ)	文献
化石能源	煤	原煤开采	原煤直接蓝水足迹	0.014	[21]
			原煤直接灰水足迹	0.137	[22]
		洗煤	洗煤直接蓝水足迹	0.007	[21]
			洗煤直接灰水足迹	0.027	[22]
	石油	原油开采	原油直接蓝水足迹	0.167	[23]
			原油直接灰水足迹	0.016	[24,25]
		加工	原油加工直接蓝水足迹	0.057	[26]
			原油加工直接灰水足迹	—	
	天然气	开采	天然气直接蓝水足迹	0.077	[27]
			天然气直接灰水足迹	0.013	[25,28]
		加工净化	天然气加工直接蓝水足迹	0.006	[29]
			天然气加工直接灰水足迹	—	
电力	水电	水库的蒸发和渗漏	水电直接蓝水足迹	6.750	[30]
		水电厂的建设	水电间接蓝水足迹	0.002	[12]
	火电	冷却系统	火电直接蓝水足迹	0.681	[31]
			火电直接灰水足迹	0.083	[19,28,32]
		火电的能源投入	火电间接蓝水足迹	0.063	[19]
			火电间接灰水足迹	0.387	[19]

制工业污染物排放标准^[24]中规定石油行业废水排放中可接受的最大COD值为50 mg/L。石油加工过程的直接灰水足迹由于缺乏数据,本文并未计算。由于天然气行业没有具体的污染物排放标准,研究参考地表水环境质量标准^[28],选择30 m/L作为天然气行业废水排放中可接受的最大COD值。

水力发电期间的耗水主要来源于水库的蒸发和渗漏,即直接蓝水足迹^[30]。水力发电间接蓝水足迹指大坝建设的水消耗,为0.00168 m³/GJ^[12]。在对火电直接灰水足迹的参数选择时,运用产排污系数^[32]计算火力发电生产单位产品所产生的COD产生量,火电行业的能源燃料投入比重来源于2017年《中国能源统计年鉴》中的全国能源平衡表。参考地表水环境质量标准^[28],选择30 m/L作为火电行业废水排放中可接受的最大COD值。火电的间接蓝水足迹是火电过程中投入能源的蓝水足迹,火电的间接灰水足迹是火电过程中投入能源的灰水足迹。

3 结果与分析

3.1 能源水足迹时空特征分析

3.1.1 能源水足迹时间演化特征分析

基于能源水足迹评价模型,根据公式(1)–(4)计算出2004—2016年中国原煤、原油、天然气、水电、火电5类能源水足迹值,结果如图1所示。化石能源水足迹在研究期内以2012年为界先增加后减

少。2004—2012年市场能源需求的快速增长促使这一阶段化石能源产量持续增长,化石能源水足迹随之持续增长至2012年达到区间最高值185.73亿m³;2012—2016年处在能源“十二五”战略时期,能源结构不断优化升级,化石能源总产量下降,化石能源水足迹呈减少趋势。从能源水足迹结构上看,化石能源水足迹中原煤水足迹约占84%并长期稳定,原油水足迹比重为11%~18%呈持续减少趋势,天然气水足迹比重最小但呈持续增长趋势。从化石能源灰水足迹上看,化石能源灰水足迹在化石能源水足迹中的比重高达70%以上,化石能源灰水足迹时序演化特征与化石能源水足迹基本一致,于2012年达到区间最高值144.57亿m³。

电力水足迹在2004—2016年间呈持续快速增长趋势。2016年电力水足迹为482.79亿m³,是2004年电力水足迹的3倍,这归因于这期间电力行业受国家政策等因素影响促使电力生产量持续增长。从电力水足迹结构上看,水电水足迹比重从2004年的52%增长至2016年的60%,火电水足迹比重相应逐渐降低。从电力灰水足迹上看,电力灰水足迹时序演化特征与电力水足迹也基本一致,至2016年最高达到75.07亿m³,电力灰水足迹在电力水足迹中的比重在20%以下且呈减少趋势。

对比图1中化石能源与电力水足迹发现,电力

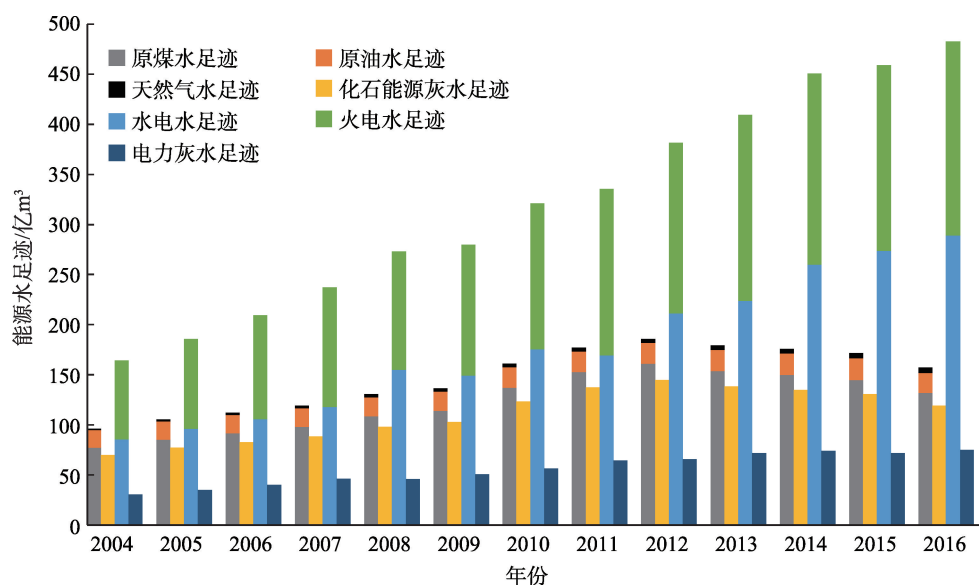


图1 2004—2016年中国能源水足迹

Figure 1 Water footprint of energy in China, 2004-2016

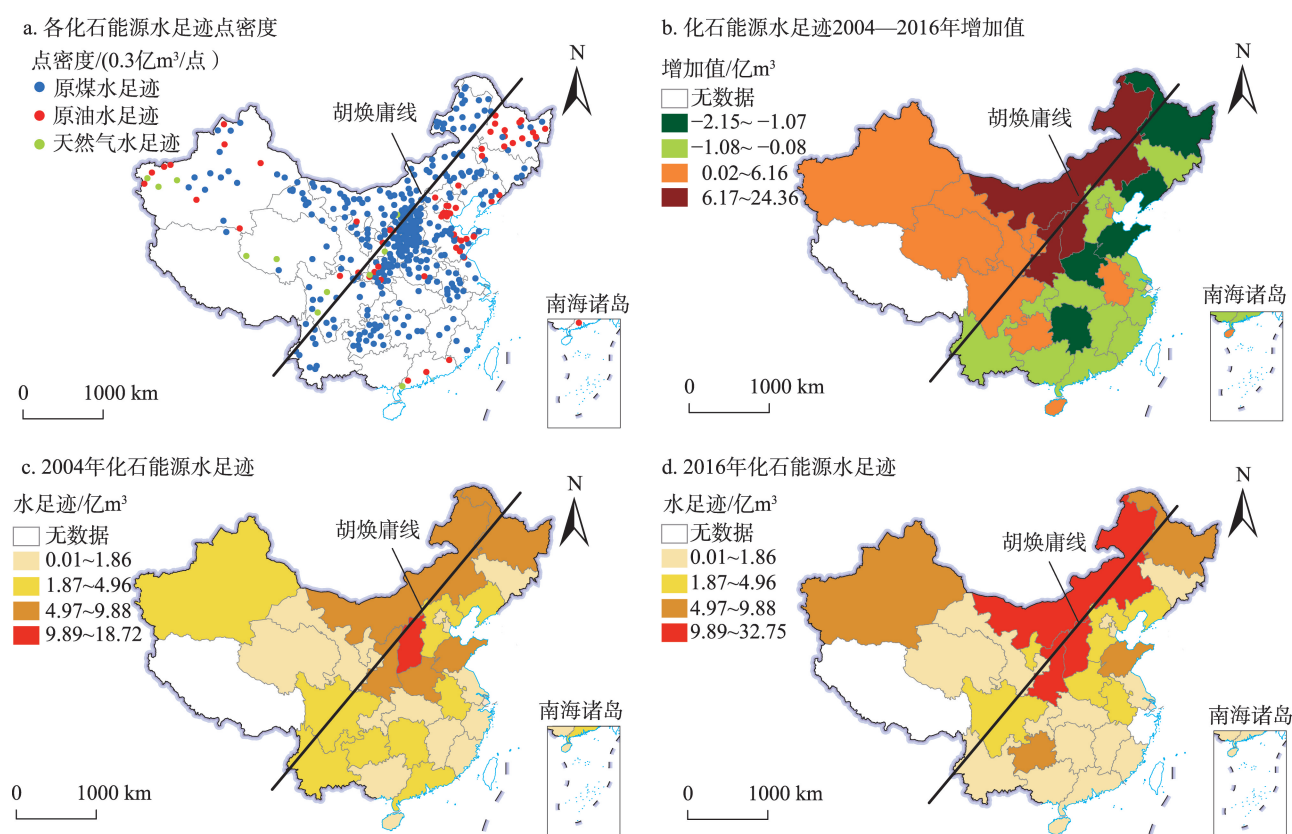
水足迹大于化石能源水足迹,二者差距逐渐增大,化石能源水足迹与电力水足迹的比值从2004年的1:1.71逐渐增长为2016年的1:3.07。水电水足迹在5类能源水足迹中的增长速度最快,平均增长速度达到12.93亿 m^3/a ,进而导致电力水足迹的快速增加并未带来电力灰水足迹的大幅度增加,至2016年电力灰水足迹仅为化石能源灰水足迹的63%。这表明在一定能源生产量下,能源生产结构中水电比重的增加既充分利用了水资源又直接减少了能源生产对水资源的污染。

3.1.2 能源水足迹空间演化特征分析

中国能源水足迹在空间分布上差异较大,这是由各地区的资源禀赋、经济发展方向、政策扶持等条件的不同而导致的。为揭示中国能源水足迹的空间演化特征,基于中国30个省(市、自治区)的能源水足迹值,运用ArcGIS10.2软件制图并分析各类能源水足迹的空间分布与演化特征,如图2、图3

所示。

由图2a所示,化石能源水足迹分布契合化石能源主产区布局。原煤水足迹分布广且密度高,在太行山、贺兰山一带的内蒙古、山西、陕西和河南形成了主要高值集聚区,在四川、贵州、云南三省形成相对高值集聚区。原油水足迹、天然气水足迹与原煤水足迹相比分布较为分散,没有形成明显的高值集聚区。原油水足迹的高值区主要包括东北地区、环渤海地区及陕西、广东和新疆,天然气水足迹的高值区主要包括四川、新疆、陕西、青海、黑龙江和广东。由图2b可以看出,研究期内化石能源水足迹主要以胡焕庸线为界,西向增加、东向减少。由于以山西、蒙东、鄂尔多斯盆地、新疆和西南5个国家综合能源基地组成的中国主要能源生产区大部分位于胡焕庸线以西,随着化石能源产量的增加,化石能源水足迹呈增长趋势,增量在0.02~24.36亿 m^3 之间。晋蒙陕和西北地区化石能源增量主要以原煤



审图号: GS(2019)1825号

图2 2004—2016年中国省际化石能源水足迹及其变化分布

Figure 2 Distribution and spatial variation of the water footprint of fossil energy in 30 provinces of China, 2004-2016

2019年11月

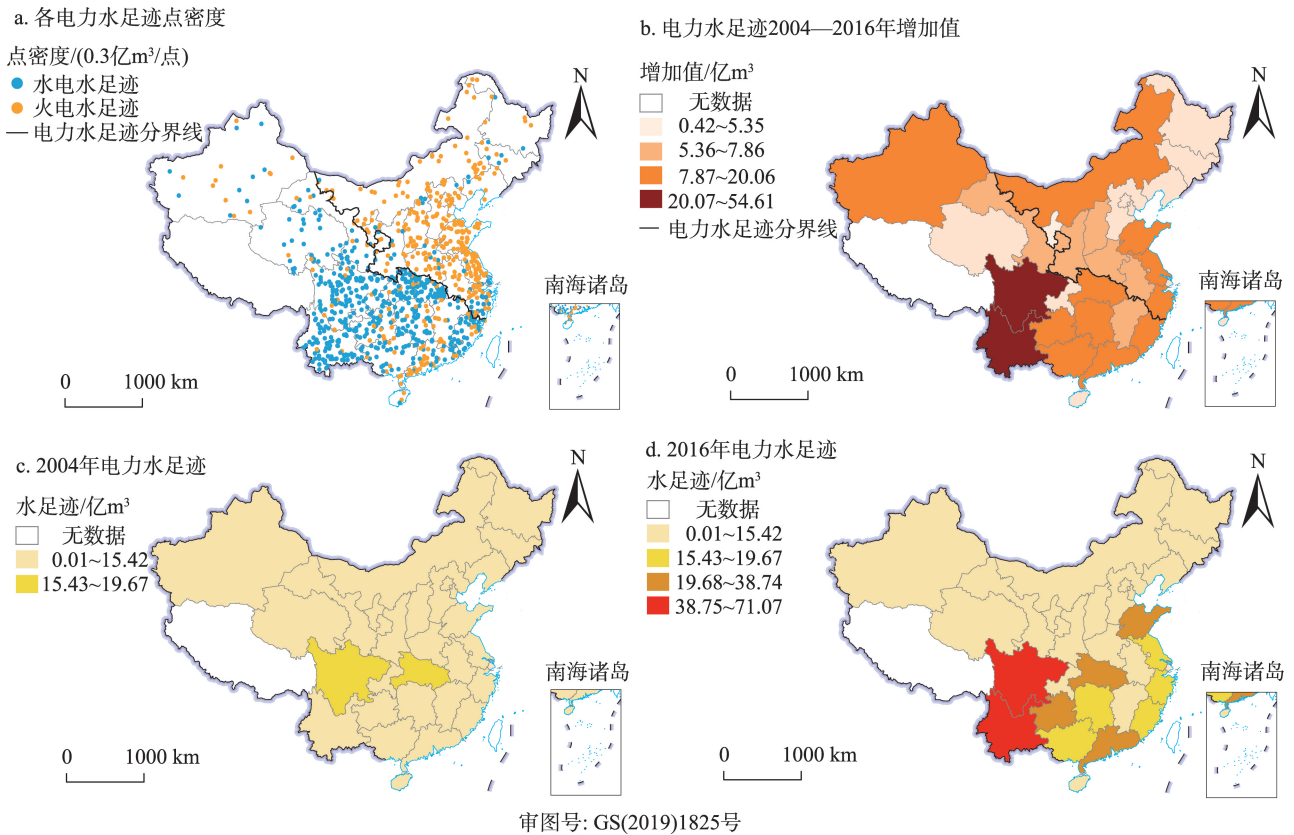


图3 2004—2016年中国省际电力水足迹及其变化分布

Figure 3 Distribution and spatial variation of the water footprint of power in 30 provinces of China, 2004-2016

为主,尤其是晋蒙两省的原煤产量增加最多,两省化石能源水足迹增量最高。四川仅天然气产量有所增加,其化石能源水足迹增量远小于其他地区。胡焕庸线以东地区作为中国主要能源消费区,其大部分区域的化石能源产量明显减少,化石能源水足迹随之呈减少趋势,减量在0.08~2.15亿m³之间。研究发现,胡焕庸线不仅是中国人口分界线,也是中国化石能源水足迹空间演变的重要分界线。随着国家能源供给战略的向西迁移,对中国化石能源水足迹的空间格局也产生较大影响,对比图2c-d可以发现,从2004年以胡焕庸线沿线地区为主要高值区,转变为2016年以蒙晋陕地区为高值中心集聚的演变趋势。

如图3a所示,火电水足迹分布与原煤生产区存在高度关联,而水电水足迹分布主要受水资源丰腴程度的影响。以电力水足迹中火电水足迹和水电水足迹比重作为划分依据,电力水足迹分界线以北的内蒙古、山西、陕西、河南、山东等地区煤炭资源

丰富,火电水足迹比重高于50%,形成火电水足迹集聚区;电力水足迹分界线以南的四川、湖北、云南、贵州、广西等地区水资源充沛,水电水足迹比重高于50%,形成水电水足迹集聚区。由图3b可以看出,2004—2016年中国各省(市、自治区)电力水足迹均呈现逐年增长的趋势,增长范围在0.42~54.61亿m³。电力水足迹分界线以南地区的电力水足迹增量普遍高于该分界线以北地区。这是由于电力水足迹分界线以南的长江流域、珠江流域及东南沿海拥有充沛的水流量和适宜建设水电站的地势条件,其水电项目在国家政策的大力支持下发展迅速,尤其是2013年后四川省的锦屏水电站、四川省与云南省交界的向家水电站等水电项目的陆续投产,大大增加了四川和云南的水电生产量,使其电力水足迹增量最大。电力水足迹分界线以北地区中京津冀晋豫地区由于受到严格控制,其大中型城市及附近地区不再布局新的燃煤电站,进而限制其火电水足迹增长速度。内蒙古、新疆拥有较多煤炭

资源,为促进当地经济的快速发展而新增加火电项目,导致其火电水足迹增量较多。水电的迅速发展和火电的有效控制促使中国电力水足迹的空间差异逐渐增大,对比图 3c-d 可以发现,2004—2016 年电力水足迹逐步形成沿长江流域、珠江流域及东南沿海高值集聚的空间演变趋势。

3.2 中国能源水足迹与水资源空间匹配关系

中国水资源在地理空间上的差异制约能源行业发展的同时,能源生产量的增加也在不同程度上加重各地区的用水压力。一些水资源较为匮乏的区域,能源水足迹的增长更容易加速当地水资源的短缺和水污染。为分析中国能源水足迹与水资源空间格局匹配关系,运用 ArcGIS 10.2 软件生成 2004—2016 年能源水足迹和可利用水资源量的重心与标准差椭圆,利用公式(5)计算获得 2004—2016 年 5 个时间节点的能源水足迹和可利用水资源量的重心坐标,进而计算获得相对重心距离,如图 4、表 2 所示,为了便于观察仅显示起止年份的标准差椭圆。

由图 4a 可以看出,可利用水资源量和电力水足迹的标准差椭圆覆盖中国中部和南部的大部分地

区,化石能源水足迹的标准差椭圆覆盖化石能源产量较高的中部和北部大部分地区。电力水足迹的标准差椭圆与可利用水资源量的标准差椭圆相交面积大,说明电力水足迹与可利用水资源量在空间格局上的匹配程度高。化石能源水足迹的标准差椭圆与可利用水资源量的标准差椭圆相交面积相对较小,说明化石能源水足迹与可利用水资源量的匹配程度较低于电力水足迹与可利用水资源的空间匹配程度。

由表 2 和图 4b 可以看出,化石能源水足迹相比电力水足迹与可利用水资源量的重心距离较大,进一步验证了化石能源水足迹与可利用水资源的空间匹配程度低。2004—2016 年可利用水资源量重心呈无规则移动,化石能源水足迹重心整体向西北方向移动,电力水足迹重心整体向西南方向移动,化石能源水足迹和电力水足迹与可利用水资源量的重心距离均呈现波动增长趋势。说明化石能源水足迹、电力水足迹与可利用水资源量在空间格局上的匹配程度有所下降。在 2013 年后化石能源水足迹、电力水足迹与可利用水资源量的重心距离增加幅度较大,即西电东输、疆电外送等项目的投产

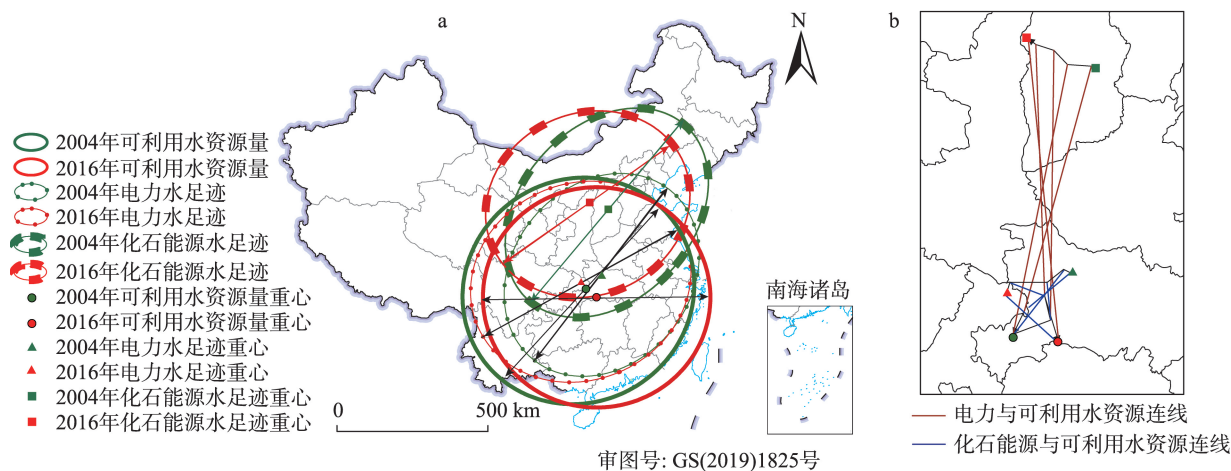


图 4 中国能源水足迹与可利用水资源量的标准差椭圆分布(a)和重心(b)

Figure 4 Gravity center and standard deviation elliptic distribution of the water footprint of energy and available water resources in China

表 2 2004—2016 年中国能源水足迹与可利用水资源量的相对重心距离

Table 2 Gravity center relative distance between the water footprint of energy and available water resources in China, 2004-2016

分类	2004 年	2007 年	2010 年	2013 年	2016 年
化石能源水足迹与可利用水资源量的相对重心距离/km	728.177	789.021	773.555	721.311	876.097
电力水足迹与可利用水资源量的相对重心距离/km	189.075	256.811	123.271	98.302	208.090

2019年11月

在地理学空间维度上对当地的水资源产生一定影响。

3.3 中国能源水足迹压力指数

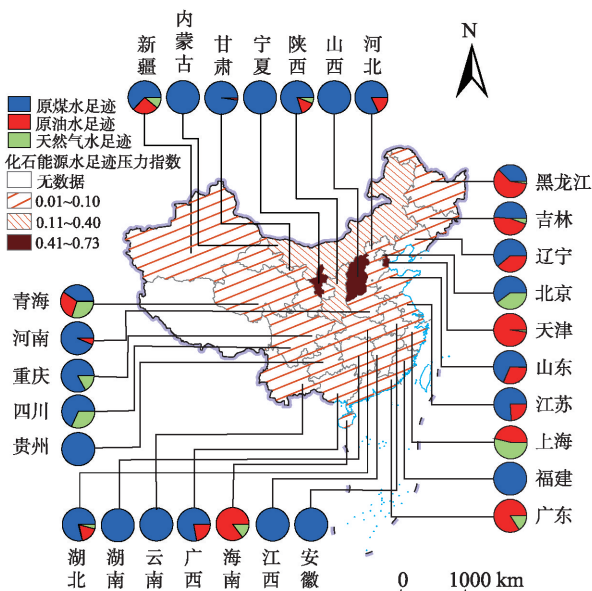
能源水足迹与可利用水资源量的匹配程度存在“木桶”原理,即受到化石能源水足迹压力指数和电力水足迹压力指数的共同制约,二者之中任何一个指数过高,都会对水资源产生压力。图5为2016年中国各省(市、自治区)能源水足迹与可利用水资源量空间匹配程度图,研究按照匹配程度的不同将其分为3个类型:①当 $F>40\%$ 时为能-水关系紧张型区域,即能源生产对当地水资源环境造成较大压力,甚至造成水资源的污染、短缺,能源与水资源关系较为紧张;②当 F 介于 $10\%\sim 40\%$ 之间时为能-水关系制约型区域,即能源生产对当地水资源环境存在一定压力,当地能源行业的发展受到水资源的制约。③当 $F<10\%$ 时为能-水关系缓和型区域,即能源生产对当地水资源环境的压力较小,能源与水资源关系较为缓和。

综合图2、图3和图5可以看出,化石能源水足迹压力指数较高的区域主要分布在太行山、贺兰山一带的原煤水足迹高值集聚区,电力水足迹压力指数较高的区域主要分布在东部地区的火电水足迹

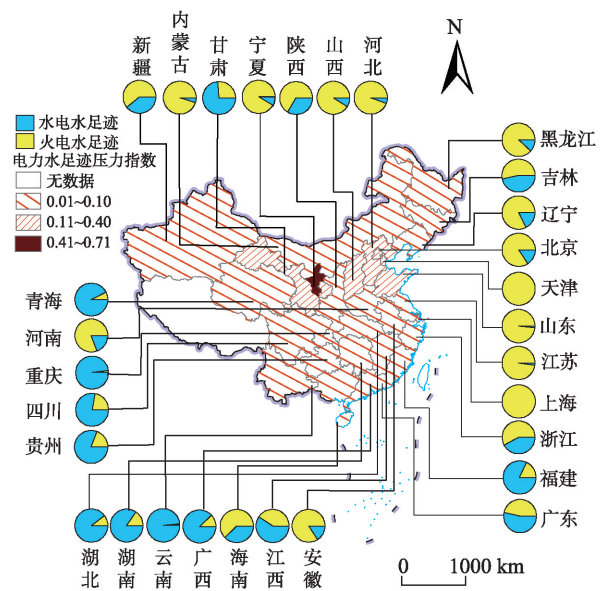
高值集聚区。整体来看,能源水足迹和可利用水资源量的匹配程度存在南高北低的分异现象,北方地区以能-水关系紧张型区域和能-水关系制约型区域为主,南方地区以能-水关系缓和型区域为主。能-水关系紧张型区域和能-水关系制约型区域的能源水足迹的原煤水足迹和火电水足迹比重较大,其大部分地区既是原煤水足迹和火电水足迹的高值区,又是能-水匹配压力较大的地区,说明原煤水足迹和火电水足迹的空间分布格局是负面影响能源水足迹和水资源空间匹配的主要因素,原煤生产与火力发电的能-水矛盾最突出。

能-水关系紧张型区域有宁夏、天津和山西3个省(市、自治区),这些地区的水资源极为匮乏,其可利用水资源量分列全国倒数第一、二、五位,且宁夏和山西的化石能源水足迹以原煤水足迹为主,3个地区的电力水足迹均以火电水足迹为主。其中,宁夏的化石能源水足迹和电力水足迹虽较小,但其水资源的严重稀缺导致当地的能源和水资源关系较为紧张。山西的原煤水足迹和火电水足迹均较高,导致其化石能源水足迹压力指数和电力水足迹压力指数远大于其他地区。另外,天津的石油资源丰富,其原油水足迹较高且在化石能源水足迹中占绝

a. 化石能源



b. 电力



审图号: GS(2019)1697号

图5 2016年中国省际能源水足迹与水资源空间匹配程度

Figure 5 Spatial matching relation between the water footprint of energy and available water resources in 30 provinces of China, 2016

大比重,导致天津的原油生产与当地水资源之间存在突出矛盾。

能-水关系制约型区域有内蒙古、甘肃、陕西、河北、山东、北京、上海7个省(市、自治区),均为水资源较为短缺的地区,且这些地区(除上海外)的化石能源水足迹主要以原煤水足迹为主,这些地区(除甘肃外)的电力水足迹主要以火电水足迹为主。其中,山东、内蒙古和陕西经济发展以第二产业为主,且能源产量较大,能源水足迹也较高,其能源生产对当地水资源造成一定压力。甘肃境内的长江流域水资源较为丰沛,建有一定数量的水电项目,导致甘肃的水电水足迹比重大于火电水足迹,但甘肃的水资源分布极不均衡且总体上较为短缺,对其能源生产造成一定的限制。另外,北京和上海经济发展程度高、人口密度大,在产业结构、国家政策等因素影响下其化石能源生产结构较为优化,天然气水足迹比重远大于其他地区,能源水足迹总体较低,但其可利用水资源量较小,分列全国倒数第三、四位,导致北京和上海的电力水足迹压力指数较大。

能-水关系缓和型区域的个数占60%,包括南方地区、东北三省、新疆和青海。南方地区的化石能源储量较少,水资源储量较多,化石能源水足迹总体较低,大部分地区的电力生产方式以水电为主,水电水足迹比重较高,因此当地的能源水足迹与水资源较为匹配。新疆地广人稀且水资源分布较不均衡,总体的水资源和能源储量较多,化石能源种类丰富,但由于经济发展较为落后,能源开发程度低于其他地区,所以其能源水足迹压力指数较小。东北三省虽然拥有丰富的煤炭资源,但由于原煤开采的地质条件较差,制约了煤炭和火电产业的发展,使得其能源水足迹与其他能源储量丰富地区相比较小,当地的能源生产对水资源的压力较小。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文采用自下而上的能源水足迹评价模型,克服了自上而下的投入产出模型因受到数据限制而无法反映能源水足迹现状的特点。通过对中国化石能源水足迹和电力水足迹时序和空间格局演变的实证研究,刻画出中国化石能源水足迹和电力水

足迹时间上和空间格局上的变化轨迹,并结合重心和标准差椭圆模型及能源水足迹压力指数分析中国能源水足迹与水资源空间匹配关系,得到以下结论:

(1)从时间上来看,化石能源水足迹在研究期内以2012年为界先增长后减少,天然气水足迹占比持续增加,但比重较小;电力水足迹在研究期内持续增长,水电比重不断增加。电力水足迹大于化石能源水足迹,但电力灰水足迹小于化石能源灰水足迹。在一定能源生产量下,能源生产结构中水电比重的增加既充分利用了水资源又直接减少了能源生产对水资源的污染。

(2)从空间格局上看,化石能源水足迹总体上呈以胡焕庸线为界西向增长、东向减少,空间格局从2004年以胡焕庸线沿线地区为主要高值区,转变为2016年以蒙晋陕地区为高值中心集聚的演变趋势;电力水足迹在各地均呈逐年增长的趋势,电力水足迹分界线将界线以北的蒙、晋、陕、鲁、豫等地区划分为火电水足迹集聚区,界线以南的川、鄂、滇、黔、桂等地区划分为水电水足迹集聚区,水电水足迹的快速增长使界线以南地区的电力水足迹增量普遍高于界线以北地区,逐步形成沿长江流域、珠江流域及东南沿海高值集聚的演变趋势。

(3)能源水足迹与可利用水资源的空間匹配程度呈波动下降趋势,化石能源水足迹较电力水足迹与可利用水资源的空間匹配程度低。能源水足迹和可利用水资源的匹配程度存在南高北低的分异现象,北部以能-水关系紧张型区域和能-水关系制约型区域为主,南部以能-水关系缓和型区域为主。全国能-水不匹配地区占1/3,主要分布在华北和陕甘宁地区,其中,华北地区既是能-水匹配压力大的地区,又是原煤水足迹和火电水足迹的高值区,原煤生产与火力发电的能-水矛盾最突出。

4.2 讨论

中国能源水足迹整体上呈增长趋势,能源水足迹和水资源的不匹配问题也逐渐突出,这无疑加重了中国水资源短缺问题。在通过技术创新来减少能源生产生命周期单位产量水足迹的同时,应该合理调整能源产业空间格局以优化其水需求配置。能源发展“十三五”规划中提出能源产业应该根据水资源来发展,在水资源丰富的地区开发和调整能

源产业,在促进经济发展的同时,充分考虑地区的资源承载力。本文认为能-水关系紧张型区域的能源生产所造成的水资源短缺已经影响到当地其他的经济活动和居民生活,应减少能源产量以缓解水资源压力;能-水关系制约型区域应合理调整这类区域的能源产业结构,增加天然气等单位产量能源水足迹少且较为清洁能源的比重,让经济发展与水资源保护并行;能-水关系缓和型区域可根据当地的资源禀赋情况合理发展能源产业,对于化石能源储量较少的区域可适当发展风能、核能、潮汐能等新能源。另外,能-水关联管理的法律法规的制定及相关指标的明确,也将促进能源和水资源的协同发展。

本文的贡献主要有以下几个方面:首先,运用能源水足迹作为衡量能源生产生命周期中占用和污染水资源的指标,相比于能源耗水量等指标而言,能源水足迹更加接近真实的用水量,弥补了现有国内多资源关联研究对能源与水资源间量化关联分析方面的不足;其次,相比于目前较多的单一年份能源水足迹研究而言,基于多年份的数据弥补了能源水足迹时间和空间维度上演变趋势研究的空缺;再次,针对现有能源水足迹与水资源匹配关系方面研究的不足,运用能源水足迹压力指数度量能源生产对水资源造成的压力,进而比较各区域能源与水资源空间匹配的差异程度。

本文处于基础探索阶段,不可避免存在一些不足之处:由于中国尚未进行部分能源的单位用水量及COD排放量标准的制定,用已有文献的结果进行计算会带来一定偏差;本文并未考虑各地区替代水源和再循环水的使用、化石能源加工或洗选的类型和程度、开采煤层的性质及存水蒸发速率的不同对各能源单位产量水足迹带来的偏差;由于无法获得风能、核能、潮汐能等新能源的相关数据,本文未计算其水足迹对整体能源水足迹的影响。

参考文献(References):

- [1] Chen Q Y, An T L, Lu S B, et al. The water footprint 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.
- [2] Ali B, Kumar A. Development of life cycle water footprints for oil sands based transportation fuel production[J]. Energy, 2017, 131: 41-49.
- [3] Ma X T, Yang D L, Shen X X, et al. How much water is required for coal power generation: An analysis of gray and blue water footprints[J]. Science of the Total Environment, 2018, 636: 547-557.
- [4] Okadera T, Geng Y, Fujita T, et al. Evaluating the water footprint of the energy supply of Liaoning Province, China: A regional input-output analysis approach[J]. Energy Policy, 2015, 78(3): 148-157.
- [5] Zhang C, Anadon L D. Life cycle water use of energy production and its environmental impacts in China[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(24): 14459-14467.
- [6] Liao X W, Zhao X, Jiang Y, et al. Water footprint of the energy sector in China's two megalopolises[J]. Ecological Modelling, 2019, 391: 9-15.
- [7] Xiao Z Y, Yao M Q, Tang X T, et al. Identifying critical supply chains: An input-output analysis for Food-Energy Water Nexus in China[J]. Ecological Modelling, 2019, 392: 31-37.
- [8] Okadera T, Chontanawat J, Gheewala S H. Water footprint for energy production and supply in Thailand[J]. Energy, 2014, 77: 49-56.
- [9] Scherer L, Pfister S. Global water footprint assessment of hydro-power[J]. Renewable Energy, 2016, 99: 711-720.
- [10] Ghani H U, Silalertruksa T, Gheewala S H. Water-energy-food nexus of bio ethanol in Pakistan: A life cycle approach evaluating footprint indicators and energy performance[J]. Science of the Total Environment, 2019, 687: 867-876.
- [11] Ma X T, Zhai Y Z, Zhang R R, et al. Energy and carbon coupled water footprint analysis for straw pulp paper production[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233: 23-32.
- [12] 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.
- [13] ISO. ISO 14046: 2014 Environmental Management- Water Footprint- Principles, Requirements and Guidelines[R]. Switzerland: ISO, 2014.
- [14] 孙才志, 白天骄, 吴永杰, 等. 要素与效率耦合视角下中国人均灰水足迹驱动效应研究[J]. 自然资源学报, 2018, 33(9): 1490-1502. [Sun C Z, Bai T J, Wu Y J, et al. Driving effect of per capita grey water footprint in China from the perspective of factor and efficiency coupling[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(9): 1490-1502.]
- [15] 韩琴, 孙才志, 邹玮. 1998-2012年中国省际灰水足迹效率测度与驱动模式分析[J]. 资源科学, 2016, 38(6): 1179-1191. [Han Q, Sun C Z, Zou W. Grey water footprint efficiency measure and its driving pattern analysis on provincial scale in China from 1998

- to 2012[J]. *Resources Science*, 2016, 38(6): 1179–1191.]
- [16] 李云玲, 郭旭宁, 郭东阳. 水资源承载力评价方法研究及应用[J]. *地理科学进展*, 2017, 36(3): 342–349. [Li Y L, Guo X N, Guo D Y. An evaluation method of water resources carrying capacity and application[J]. *Progress in Geography*, 2017, 36(3): 342–349.]
- [17] 陈俊旭, 张士锋, 华东, 等. 基于水足迹核算的北京市水资源保障研究[J]. *资源科学*, 2010, 32(3): 528–534. [Chen J X, Zhang S F, Hua D, et al. A study on water resources guarantee in Beijing City based on water footprint evaluation[J]. *Resources Science*, 2010, 32(3): 528–534.]
- [18] 白景峰, 张海军. 中国水-能源-粮食压力时空变动及驱动力分析[J]. *地理科学*, 2018, 38(10): 1653–1660. [Bai J F, Zhang H J. Spatio-temporal variation and driving force of water-energy-food pressure in China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(10): 1653–1660.]
- [19] 中华人民共和国国家统计局. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005–2017. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Energy Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2005–2017.]
- [20] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005–2017. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2005–2017.]
- [21] 国家环境保护总局. 清洁生产标准: 煤炭采选业(HJ 446–2008) [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008. [Ministry of Environmental Protection. *Cleaner Production Standard Coal Mining and Processing Industry (HJ 446–2008)* [S]. Beijing: Ministry of Environmental Protection of China, 2008.]
- [22] 国家环境保护总局. 煤炭工业污染物排放标准(GB 20246–2006) [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006. [Ministry of Environmental Protection. *Emission Standard for Pollutants from Coal Industry (GB 20246–2006)* [S]. Beijing: Ministry of Environmental Protection of China, 2006.]
- [23] 李何. 石油天然气开采业(稠油)清洁生产指标体系的研究[J]. *油气田环境保护*, 2003, 13(1): 16–18. [Li H. The study on cleaner production index system for oil & natural gas exploitation (Thick Oil) [J]. *Environmental Protection of Oil & Gas Fields*, 2003, 13(1): 16–18.]
- [24] 国家环境保护总局. 石油炼制工业污染物排放标准(GB 31570–2015) [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015. [Ministry of Environmental Protection. *Emission Standards for Pollutants in Petroleum Refining Industry (GB 31570–2015)* [S]. Beijing: Ministry of Environmental Protection of China, 2015.]
- [25] 中华人民共和国国家统计局. 中国环境统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Environmental Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.]
- [26] 王炜亮. 石化产业生态分析及水资源优化利用研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. [Wang W L. *Ecological Analysis and optimized Utilization of Water Resources in Petrochemical Industry* [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.]
- [27] 四川省水利科学研究院. 四川省用水定额(修订稿) [R]. 成都: 四川省水利科学研究院, 2010. [Sichuan Academy of Water Conservancy. *Water Consumption Quota in Sichuan (Revised Manuscript)* [R]. Chengdu: Sichuan Academy of Water Conservancy, 2010.]
- [28] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准(GB 3838–2002) [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. [National Environmental Protection Administration, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. *Environmental Quality Standards for Surface Water (GB 3838–2002)* [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.]
- [29] 雷英, 刘蔷, 唐伟, 等. 天然气处理厂节能减排对低碳经济的推动作用[J]. *石油与天然气化工*, 2011, 40(4): 358–361. [Lei Y, Liu Q, Tang W, et al. Promoting role of energy saving and emission reduction of natural gas treating plant on low carbon economy [J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2011, 40(4): 358–361.]
- [30] Liu J G, Zhao D D, Gerbens-Leenes P W, et al. China's rising hydropower demand challenges water sector [J]. *Scientific Reports*, 2015, DOI: 10.1038/srep11446.
- [31] 中华人民共和国工业和信息化部, 中华人民共和国水利部, 中华人民共和国国家统计局, 等. 重点工业行业用水效率指南[EB/OL]. (2013–09) [2019–03–19]. <http://www.miit.gov.cn/n1146295/n1652858/n1652930/n3757016/c3762100/part/3762101.pdf>. [Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Water Resources, National Bureau of Statistics of the People's Republic of China, et al. *The Guidance of Water Efficiency in Main Industry Sectors* [EB/OL]. (2013–09) [2019–03–19]. <http://www.miit.gov.cn/n1146295/n1652858/n1652930/n3757016/c3762100/part/3762101.pdf>.]
- [32] 朱法华, 钟鲁文, 王强, 等. 火电行业主要污染产物排放系数 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009. [Zhu F H, Zhong L W, Wang Q, et al. *Emission Coefficient of Main Pollution Products in Thermal Power Industry* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2009.]

Spatiotemporal feature of the water footprint of energy and its relationship with water resources in China

GUAN Wei^{1,2}, ZHAO Xiangning¹, XU Shuting²

(1. Center for Studies of Marine Economy and Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China;

2. School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: Energy and water resources are very important for human survival and social development. Energy and water footprint can reflect the real situation of water resources occupation in the process of energy production. With the help of the water footprint assessment model, this study measured and calculated the life cycle water footprint of fossil energy and electricity production in 30 provinces (municipalities, autonomous regions) in China. It examined the spatiotemporal patterns of water footprint of raw coal, crude oil, natural gas, hydropower, and thermal power in China from 2004 to 2016, and analyzed the spatial matching relationship between water footprint and water resources. The results show that: During the study period, the water footprint of fossil energy production increased before 2012 and decreased thereafter, and the rapid growth of water footprint of hydropower contributed to the continuous growth of water footprint of power. Spatially the water footprint of fossil energy production increased west of the Aihui-Tengchong Line and decreased to its east, and there is a high-value cluster in the Inner Mongolia-Shanxi-Shaanxi area. With regard to the water footprint of power, there is a clear spatial division between hydropower and thermal power, and the rapid growth of the water footprint of hydropower makes the Yangtze River Basin, the Pearl River Basin, and southeastern coastal areas gradually form high value concentration areas of water footprint of power. The spatial matching degree of water footprint and water resources fluctuates downwards from the south to the north, and the matching degree of water footprint of fossil energy production is lower than that of the water footprint of power and water resources. The contradiction of energy-water between raw coal production and thermal power generation is most prominent. There is a problem of energy-water mismatch in one third areas of China, and the energy-water matching pressure in North China with high water footprint is large. The contradiction between energy production and water resource endowment still exists. Reflecting on the matching relationship between energy water footprint and water resources will help optimize the comprehensive management of energy and water resources and provide a quantitative basis for maximizing the synergy of energy and water.

Key words: energy-water nexus; water footprint of energy; life cycle assessment; water resources; spatial matching; green development