

中国能源生产用水的空间特征分析

董东林¹, 张若萌¹, 付晶莹^{2,3*}, 林刚¹

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

摘要 根据能源生产用水这一概念,通过能源生产用水压力指数的空间自相关分析,探究了能源生产与用水之间的关系。结果表明:现状年(2016)下,中国能源的高产区主要分布在北部、中东部地区,其中内蒙古、山东等5省(区)的主要能源总产量占中国主要能源生产总量的67%,低值区出现在南部及西南部部分省(区);5类主要能源生产用水的空间分布特征有所不同,但与能源资源本身的地区分布基本保持一致;主要能源的生产用水压力指数高值区主要分布在中国中部及北部省(区),空间集聚分析表明能源生产用水压力指数具有显著的空间集聚特征,H-H集聚特征显著。

关键词 能源结构;空间分布差异性;能源生产用水压力指数;空间自相关分析

水资源和能源是国际社会最为关注的基础自然资源和战略资源,社会经济的发展对水资源与能源的需求也在不断快速地增长。两者之间的关系日益得到国际社会的关注,2014年《世界水资源开发报告》的主题就为“水与能源”,报告中对当前及未来在水资源的开发利用中存在的问题、水资源与能源之间的复杂关系进行了宏观探讨^[1]。中国学者对能源与水的关系研究主要集中在能源与水的空间分布特征、能源产业耗水及其空间特征分析等。鲍淑君等^[2]总结了国际上能源与水纽带关系的研究和实践及对中国能源与水资源协同发展的启示;Zhang等^[3]通过基于多区域投入产出模型(MRIO)和生命周期影响评价(LCIA)方法对中国能

源部门的生命周期取水、耗水和废水排放及其对环境的影响进行了研究;Ding等^[4]通过能源水足迹模型计算了中国的主要化石燃料和电能的水足迹,从生命周期的角度得出3种主要化石能源的水足迹主要来源于提取阶段,并分析了未来有能源发展潜力的区域;Liao等^[5]量化了2001—2015年中国家庭能源需求的生命周期用水,并对人口、需求、经济结构和技术这4个驱动因素的影响进行了分析;洪思扬等^[6]以省级行政区为研究对象,对中国能源耗水的一些特性进行了探讨;项潇智等^[7]研究了中国能源产业的用水现状和各类能源生产的发展趋势;刘欢等^[8]利用重心和标准差椭圆空间统计方法及洛伦茨曲线和基尼系数计算方法,量化分析区

收稿日期:2018-11-12;修回日期:2019-02-28

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA19040305);中国科学院地理科学与资源研究所优秀青年人才基金项目(2016RC203);中国工程院院士咨询项目(2017-ZD-03-05-01);中央高校基本科研业务费专项(2019QD01)

作者简介:董东林,教授,研究方向为水资源与生态环境研究,电子信箱:ddl9266@163.com;付晶莹(通信作者),副研究员,研究方向为资源环境遥感,电子信箱:fujy@igsrr.ac.cn

引用格式:董东林,张若萌,付晶莹,等.中国能源生产用水的空间特征分析[J].科技导报,2019,37(11):92-100;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2019.11.011

域水-能源资源的空间分布特征及匹配格局。上述研究主要在水-能关系和能源生产耗水等方面进行,没有考虑到区域可利用水资源量这个本底要素。因此,本研究在省级行政区的尺度上,试图通过能源生产用水压力指数来构建能源生产用水与区域可利用水资源的关联,以期为中国能源生产结构的优化调整、能源与水资源的可持续发展提供参考。

1 研究方法和数据来源

1.1 能源生产用水

本研究以一次能源原煤、原油、天然气和二次能源电力为研究对象,在电力工业结构中火力发电和核能发电是用水较多的两种发电方式。5类能源生产用水的主要用途不同,如原煤、原油、天然气的生产用水主要是在开采环节;火电厂用水主要是在高温高压蒸汽的冷却、锅炉补充和除尘、输灰等过程中^[9];核能发电用水主要发生在第一、二回路,即核电站的核蒸汽供应、蒸汽与动力转换等系统中^[10]。虽然在生产过程中,各类型能源的用水方式不同,但都需要大量的水资源。此外,由于生产工艺、设备状况及地区水资源情况等因素的不同,也会造成单位能源生产用水量在不同地区存在一定的差异。因此,本文中各类主要能源的单位生产用水量由各省现行的工业用水定额表示。

工业用水定额是为生产单位数量的工业产品规定的用水限额,是指在工业生产中完成单位产品必要的用水量,包括新的取水量和重复利用的水量。工业用水定额反应了生产和用水之间的关系,是单位产品生产过程中所用水量的标准^[11]。

本研究采用自下而上的统计汇总方法,首先根据各省能源产量和单位产量用水,统计每一种能源生产用水,再将各省5类主要能源生产用水进行汇总。

能源生产用水的计算方法为能源总产量与单位产量用水量的乘积,公式为

$$W_j = U_j \times P_j \quad (1)$$

式中, W_j 为第 j 种能源生产的总用水量; U_j 为第 j 种能源的单位产量用水量,在此以第 j 种能源的生产用水定额来表示; P_j 为第 j 种能源的产量。

1.2 能源生产用水压力指数

在前人研究农业生产用水压力指数的基础上^[12],将能源生产用水压力指数定义为区域5类主要能源生产

用水量之和与该区域可利用水资源量的比值,计算公式如下

$$E_i = \sum_{j=1}^5 W_j \quad (2)$$

$$T_i = \frac{E_i}{A_i} \quad (3)$$

式中, E_i 为 i 省五类能源生产总用水量; T_i 为 i 省能源生产用水压力指数; A_i 为 i 省可利用水资源量。

1.3 空间自相关分析

空间自相关分析研究的是相邻空间上的属性值的相关性。莫兰指数是度量空间相关性的一个重要指标,广义的莫兰指数分为全局莫兰指数(Moran's I)和安瑟伦局部莫兰指数(Anselin Local Moran's I)。

全局莫兰指数统计可表示为

$$I = \frac{n \cdot \sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{X})(x_j - \bar{X})}{(\sum_i \sum_j w_{ij}) \sum_i (x_i - \bar{X})^2} \quad (4)$$

式中, n 为空间要素总数, x_i 和 x_j 表示第 i 和第 j 个空间要素的属性值, \bar{X} 为全部空间要素属性值的平均值, w_{ij} 为空间要素 i 和 j 之间的空间权重。

全局莫兰指数 I 的取值范围被归一化到 $[-1, 1]$ 内,当 $I > 0$ 时,表示空间正相关性,值越大空间相关性越显著;当 $I < 0$ 时,表示空间负相关性,值越小空间差异性明显; $I = 0$ 表明研究对象空间分布呈随机性。

全局莫兰指数是对空间自相关程度的一个综合性评价,但是它不能表征局部的空间聚集特征。局部莫兰指数能够用自己的数据与周边的数据进行比较,进而判断属性值在局部地区是否发生相似的或相异的局部集聚现象。计算公式为

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{X}) \sum_j [w_{ij} (x_j - \bar{X})]}{\sum_j (x_j - \bar{X})^2 / n} \quad (5)$$

局部莫兰指数为正说明存在相似值的空间集聚,发生H-H型聚集或L-L型聚集;值为负则说明存在相异值的空间集聚,发生L-H型聚集或H-L型聚集。

空间自相关分析需要通过明确的空间关系实现,而空间权重矩阵是空间关系的具体量化^[13]。本文以省级行政区为研究对象,又由于能源和水资源的空间分布都具有明显的地带性分布特点^[14],能源生产用水压力指数与邻近区域的关系更大,因此以空间要素 i 与 j 的邻接关系表示 w_{ij} ,对省级行政区建立基于邻接关系的空间权重矩阵。邻接是指有边或点相邻。规则为

$$W_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{区域}i\text{与区域}j\text{邻接} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

1.4 数据来源

文中使用的区域可利用水资源量数据来源于2016年《中国水资源公报》。2016年各省级行政区主要能源的产量数据来源于2017年《中国能源统计年鉴》，各省火力发电装机容量数据来源于2017年《中国电力年鉴》，5类能源生产用水定额数据来源于各省级行政区

现行的地方标准《工业用水定额》。值得注意的是，由于火力发电的用水定额根据冷却方式和单机容量的不同而不同，直流冷却方式取水量巨大，但只使用一次即被排掉，因此，本文直流冷却方式的机组用水按耗水量计算。结合各方面因素，通过实际资料的查询及相关研究成果的分析^[15-18]，总结了各省火力发电的用水定额。各省级行政区的3类主要能源生产及两类主要发电方式的用水定额数据如表1所示。

表1 中国3类主要能源生产和2类主要发电方式的用水定额
Table 1 Unit water withdrawals in mining of three kinds of main energy and two main types of power production in China

地区	原煤/(m ³ ·t ⁻¹)	原油/(m ³ ·t ⁻¹)	天然气/(m ³ ·t ⁻¹)	火力发电/(m ³ ·(MW·h) ⁻¹)	核能发电/(m ³ ·(MW·h) ⁻¹)
北京	0.34	—	4.4	3	—
天津	—	3.82	4.4	2.3	—
河北	0.7	0.75	4.4	3	—
山西	0.25	—	4.4	2.7	—
内蒙古	0.3	1.1	0.2	3.84	—
辽宁	0.5	2.5	1.8	3.2	0.18
吉林	0.8	3	4	3.84	—
黑龙江	0.8	8	2.6	3.2	—
上海	—	4	2	2.75	—
江苏	0.75	4	2	2.39	0.5
浙江	—	—	—	3.2	0.5
安徽	0.5	—	2	3.2	—
福建	0.8	—	—	3.2	0.5
江西	0.538	—	2	3.84	—
山东	0.36	4.5	2	3	—
河南	0.4	3.1	0.2	2	—
湖北	0.4	4	0.2	3.2	—
湖南	0.3	—	—	3.2	—
广东	—	4	2	3.2	0.5
广西	0.5	4	2	4.8	0.5
海南	—	6	2	3.2	0.5
重庆	1.2	—	2	3.8	—
四川	0.6	4	2	3.2	—
贵州	0.8	—	5	4.2	—
云南	0.7	—	5	3.2	—
西藏	—	—	—	3.89	—
陕西	0.2	3	0.25	3.2	—
甘肃	0.3	3	0.2	3.2	—
青海	0.4	2	0.2	3.2	—
宁夏	0.25	1.5	—	2.52	—
新疆	0.31	1.05	0.25	3.89	—

注：表中“—”表示该省2016年无此能源的生产。

2 结果与分析

2.1 能源生产用水的空间分布特征

2.1.1 中国主要能源生产的分布情况

由2016年中国各省原煤、原油、天然气及火力发电、核电发电的能源生产构成可以得出:中国能源产量的高值地区主要分布在北部、中东部地区,包括内蒙古、山西、陕西,这3个省份的主要能源产量占全国主要能源生产总量的51%;低值区主要分布在西南部地区,包括西藏、青海、江西等,这些省份的主要能源产量的总和在全国主要能源生产总量的占比不足1%,且尤以西藏和海南最低。

其中,原煤高产区分布与主要能源生产总量的高产区分布极为相似。内蒙古、山西、陕西、山东等8省的原煤产量占全国原煤总产量的85%,内蒙古产量最高,占全国原煤总产量的1/4。虽然2016年煤炭在中国能源结构中的占比降至62%,但现阶段中国的能源结构还是以煤为主。

中国石油资源的分布除广东省外,主要集中在昆仑—秦岭—长江以北的西北、华北以及东北地区,2016年新疆、陕西、山东等6省的原油产量占全国原油产量的84%。低产区主要分布在除广东省以外的大多数南方省份,且其产量远低于高产区。

中国天然气的分布除东部的渤海湾外主要集中在中西部地区的盆地,包括新疆的塔里木盆地和准噶尔盆地,青海的柴达木盆地以及中部地区的鄂尔多斯盆地和四川盆地,这些地区的天然气产量占全国天然气产量的80%左右。而低产区主要集中在北部的内蒙古以及除广东省以外的东南部大多数省份。

火力发电厂除新疆外主要分布在中国北部以及东部的能源大省。高值区出现在山东、江苏、内蒙古、广东等9省,这些省份的火力发电量占全国火力发电总量的63%;低值区除海南外主要分布在中国中部及西部地区,尤以西藏和青海省最低。

由于地质、水源、气候、放射性液体排放等多种原因,中国核电站的分布地区较少,已投运的核电站主要分布在沿海地区,包含广东、浙江、福建、辽宁等省份,其中广东和浙江两省的核电站发电量最大。

由于原煤、原油、天然气和电力的计量单位不同,在统计各省主要能源生产总量时,将各类能源统一折算成千克标准煤(kgce)。

2.1.2 中国主要能源生产用水空间分布

本文统计了中国各省级行政区2016年原煤、原油、天然气、火电、核电5类能源的生产用水,统计结果如图1所示。

对于原煤生产用水(图1(a)),其用水高值区主要分布在中国东北部地区,包括内蒙古、山西、陕西等省份,与原煤高产区分布基本一致。相应地,西南部省份如西藏、青海等原煤低产区生产用水也最低。

对于原油生产用水(图1(b)),其用水高值区比较分散,无显著的区域特征,主要集中在北部的黑龙江、天津、山东、陕西以及广东省,这与中国油田的分布特征一致。低值区主要分布在除广东省外的中国南部及东南沿海地区和除新疆外的西部地区。

对于天然气生产用水(图1(c)),其用水高值区除广东省外主要分布在中国西北部地区的新疆、四川、陕西、青海等省份。天然气生产与用水的空间分布出现不一致的现象。天然气产量最高的地区陕西省由于天然气开采用水定额为 $0.25\text{ m}^3/\text{t}$ 较低,导致该省天然气生产用水并不是最高的。而由于天然气开采用水定额较高导致四川省的天然气生产用水最高。同理,黑龙江、吉林也因此成为天然气生产用水的高值区。

对于火力发电用水(图1(d)),其用水高值区除新疆外主要分布在中国北部及东部地区的内蒙古、山东、江苏、浙江、广东等省份,低值区主要分布在西部省份,其中最低值出现在西藏和青海。现阶段中国火电厂以煤为主要燃料,2016年煤电的发电量占比为67%,因此原煤生产对火电厂的分布产生直接影响,对比图1(a)可以看出,火电生产用水与原煤生产用水的空间分布特征基本一致。值得关注的是,广东省火电用水与原煤生产用水的空间分布不匹配,表现为火电生产用水量较大,但原煤生产用水量较小,主要是因为广东省煤炭资源贫乏,近10年几乎无原煤的产出,省内火力发电需要的大量煤炭资源主要通过进口。

对于核能发电用水(图1(e)),其用水区域全部分布在中国沿海省份,与中国核电站的分布一致,高值区分布在中国东南沿海的广东、浙江、福建等。而内陆地区的核电站由于目前仍处在选址阶段,因此无核能发电用水。

各省(区)5类能源生产总用水的空间分布特征如图1(f)所示,可以看出能源生产用水的高值区主要分布在中国北部以及中东部省(区),包括内蒙古、山东、山

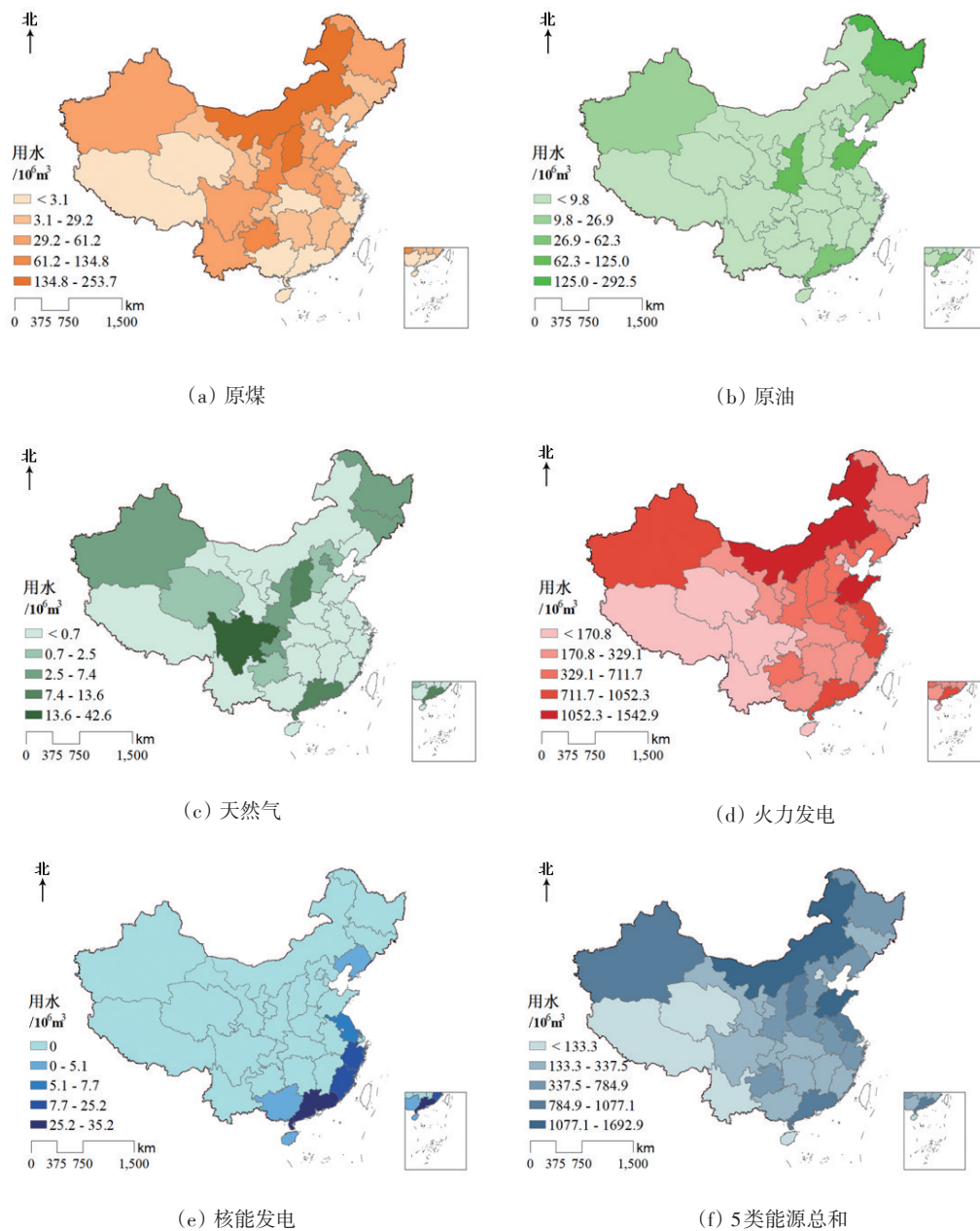


图1 2016年主要能源生产用水空间分布

Fig. 1 Spatial distributions of water withdrawal for main energy production in 2016

西、江苏等,这些省(区)的能源生产总用水量占全国能源生产用水总量的74%。相对应的用水低值区主要分布在中国西南部地区省(区),如西藏、青海、云南等。

2.2 能源生产用水压力指数空间自相关分析

2.2.1 主要能源生产用水压力指数空间分布

有学者^[19-20]在对区域水资源压力指数的研究中,对压力指数进行了分级讨论,但在能源生产用水压力治水领域,此类研究尚不足。因此,这里只是通过对各省

级行政区能源生产压力指数的相互对比来进行讨论的,其划分结果也只是相对而言。具体分析评价如下。

2016年中国5类主要能源生产用水压力指数见图2,可以看出,能源生产用水压力指数高值区主要集中在中国中部及北部省(区),包含内蒙古、宁夏、河北、山西、陕西、山东、河南、辽宁以及北京、天津、上海。其中宁夏、天津、山西及山东的能源生产压力指数最大;西部及南部为压力指数低值区,且以西藏和云南最低。

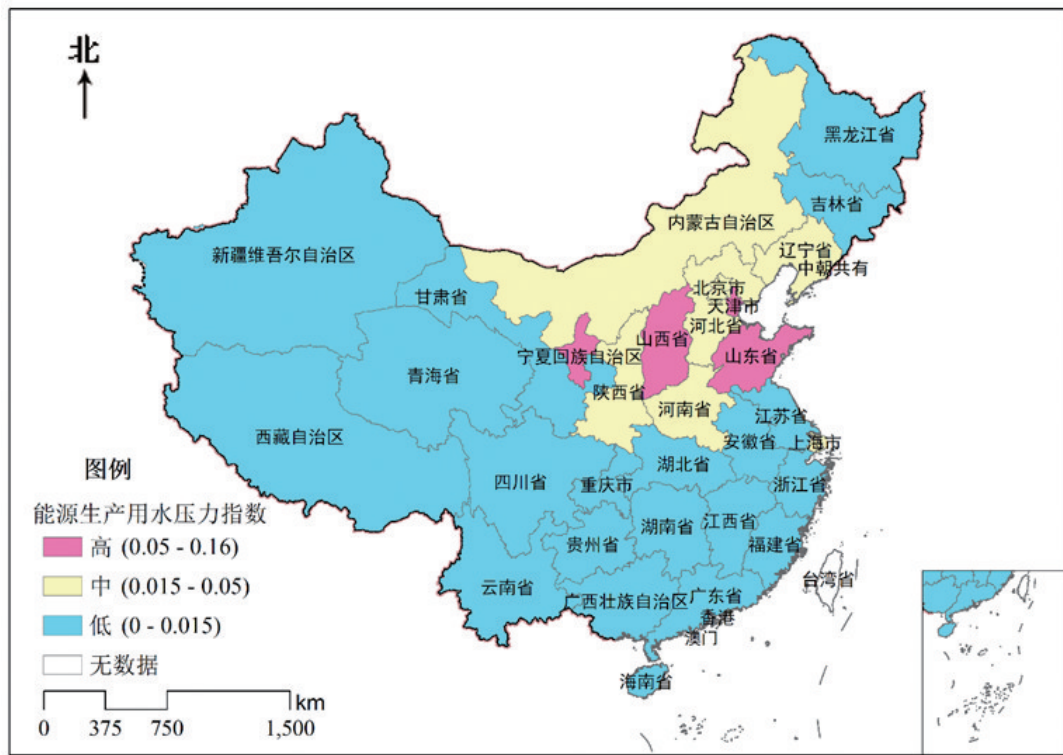


图2 2016年主要能源生产用水压力指数空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of main energy production water pressure index in 2016

2.2.2 主要能源生产用水压力指数空间自相关分析

这里对中国2016年各省5类主要能源生产用水压力指数做空间自相关分析,进一步探究中国能源生产用水压力的空间分布特征。

1) 能源生产用水压力指数的全局空间自相关分析

全局莫兰指数通过 ArcGIS 计算,具体实现步骤为 ArcToolbox—Spatial Statistics Tools—Analyzing Patterns—Spatial Autocorrelation(Morans I),计算结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出, P 值小于 0.05,说明数据分布仅有小于 5% 的可能是随机分布的,计算结果通过了 5% 水平的显著性检验。由拒绝零假设设定的阈值来看,数据拒绝了零假设,莫兰指数为正,有显著的聚类 and 空间正相关性,表现为能源生产用水压力较大的省份相互邻近、能源生产用水压力较小的省份相互邻近。

表 2 中国主要能源生产用水压力指数的全局莫兰指数

Table 2 Global Moran's I of main energy production water pressure index in China

	莫兰指数	$Z(I)$	P 值
能源生产用水压力指数	0.217449	2.381130	0.017260

2) 能源生产用水压力指数的局部空间自相关分析

局部莫兰指数可以通过 ArcGIS 进行可视化,具体实现步骤为 ArcToolbox—Spatial Statistics Tools—Mapping Clusters—Cluster and Outlier Analysis(Anselin Local Morans I)指数。计算结果显示,2016 年主要能源生产压力指数具有较为显著的 H-H 集聚区,出现一个 H-H 集聚区为天津。此结果表明,天津市的能源生产用水压力指数较高,同时以天津为中心的周期其他省份如河北、山东、山西等能源生产用水压力指数也较高。

由以上分析可以看出,中国各类能源资源和水资源在地域分布上都具有不同程度的不平衡性,且各地区能源产业用水定额、能源生产中的水资源利用效率等的不同,能源生产用水压力指数也存在显著地差异性。H-H 集聚区是传统能源资源丰富的地区,同时也是水资源匮乏的地区。而现阶段传统能源,尤其是煤炭仍然在中国能源结构中占主要地位,能源生产需要大量的水资源,因能源结构的不合理性会加剧区域用水压力,使原本水资源紧缺的北部地区更加不堪重负。

本文中地图是由 arcgis 软件生成,地图中的中国行政区划底图来自国家基础地理信息中心。

3 讨论

近年来,中国的能源政策中都涉及到了水资源管理。如国家能源局制定的《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》中,能源改革的战略目标指出,到2020年,主要能源生产领域的用水效率达到国际先进水平,优化能源生产布局要综合考虑能源资源禀赋、水资源条件、生态环境承载力等因素。《中共中央 国务院关于加快水利改革发展的决定》中提出实行“最严格的水资源管理制度”,确立了水资源开发利用,用水效率和水功能区限制纳污三条红线。“十三五”规划中,万元GDP用水量下降的规划目标设定为23%。这些对用水效率、用水总量的强制性要求,都将显著地影响能源生产行业的用水。此外,还有单独针对一种能源的水资源政策,例如《煤炭清洁高效利用行动计划(2015—2020年)》重点在煤炭资源丰富、水资源有保障、生态环境许可、运输便捷的地区,布局现代煤化工示范项目;严格控制缺水地区项目建设。

在能源生产过程中,应坚持水资源循环利用原则,严格贯彻执行工业用水定额,加强能源产业节水工艺研究和改造,以低需水能源代替高需水能源,除此之外,根据能源虚拟水的概念,可以通过国内外能源贸易节约区域水资源;能源隐含水的输入,不仅能节约中国能源,还能够减少中国能源生产中的水资源取用量^[21]。

与此同时,应该注意到水资源分布的地区差异也对能源生产有巨大影响。中国水资源分布极不均,北部的水资源在全国总量中的比例不足8%,但却集中分布了中国水资源密集型能源产业。

现阶段虽然煤、石油、天然气等常规能源仍然在中国能源生产结构中占主要位置,但是由2018年《BP世界能源展望》预测,煤炭在中国能源结构中的占比将从2016年的62%降至2040年的36%,可再生能源的占比将由3%升至18%,核能由2%升至8%^[22]。中国水资源地区分布上有显著的不均衡性,再加上社会经济活动造成的水资源短缺和水污染也十分严重,这些都造成了地区水资源紧缺程度加剧。能源与水资源关系密切,能源结构的优化和调整也是对水资源利用的优化和调整。

在全国范围内如何进行能源结构的优化调整,对中国能源与水的可持续发展尤为重要。本研究试图从能源生产用水的角度为地区能源结构的优化提供依

据,如内蒙古自治区和山西省原煤储量最为丰富,火力发电量大;陕西天然气资源储量最丰富,原煤、原油资源也较为丰富,火力发电量较大;河南、河北原煤储量丰富,火力发电量大;宁夏回族自治区原煤储量丰富,火力发电量较大。这些区域受储量原因限制,调整潜力较小,但是可以积极发展分布式可再生能源,逐渐总体上降低煤炭生产规模。

山东火力发电为全国之首,原煤、原油的资源储量丰富;辽宁原煤、原油储量丰富,火力发电量较大;天津原油储量丰富,2016年原油产量为全国第三。这些地区可以加快淘汰煤炭落后产能,大力发展新能源和可再生能源,完善国外能源输入等。

而水资源丰富的南部地区,应充分发挥该地区水资源的优势,大力发展川渝天然气,加快调整煤炭生产结构,积极发展生物质能、核电和海水风电,完善能源输入通道等。通过能源结构的优化、调整促进中国能源与水资源的可持续发展。

4 结论

1) 中国的能源高产区主要分布在北部及中东部地区,低产区则出现在南部及西南地区的部分省(区),其中内蒙古、山东等5省(区)的主要能源生产总量占中国主要能源生产总量的67%。现阶段煤炭在中国能源生产结构中占比最大约为62%,火力发电占中国发电总量的70%以上。地区能源生产主要依赖本地能源资源。

2) 5类主要能源生产用水的空间分布各有不同,其中原煤、原油、天然气的生产用水无明显的地区分布特征,但与能源资源本身的地区分布基本一致,火力发电用水主要分布在中国东部和北部的能源大省,核电用水的分布主要集中在东南沿海。

3) 主要能源的生产用水压力指数高值区主要分布在中国中部及北部省(区),空间集聚分析表明能源生产用水压力指数具有显著的空间集聚特征,H-H集聚特征显著。表明该地区能源生产用水量巨大或生产过程中水资源利用效率低,加剧地区用水压力。

研究了原煤、原油、天然气、火电、核电的生产需水空间分布特征,并通过能源生产用水压力指数对中国各省及行政区2016年5类能源生产用水压力指数做了空间相关性分析。由于数据来源、统计口径等原因,本文结果存在局限性。

1) 单位能源生产用水采用各省级行政区现行的工业生产用水定额中的值计算, 会存在一定的误差, 不能够完全准确地反映各省能源生产用水的实际状况。

2) 本研究着眼于能源生产用水, 试图提供一种思路、一种研究模式, 所以只用了2016年的数据进行了分析, 今后的研究中可以增加多年数据, 进行更加详实的统计和分析。

参考文献(References)

- [1] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). The United Nations world water development report 2014: Water and energy[R]. UNESCO, 2014.
- [2] 鲍淑君, 贾仰文, 高学睿, 等. 水资源与能源纽带关系国际动态及启示[J]. 中国水利, 2015(11): 6-9.
Bao Shujun, Jia Yangwen, Gao Xuerui, et al. Trend and inspiration of water and energy nexus[J]. China Water Resources, 2015 (11): 6-9.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Liao X W, Chai L, Ji J P, et al. Life-cycle water uses for energy consumption of Chinese households from 2002 to 2015[J]. Journal of Environmental Management. 2019, 231: 989-995.
- [6] 洪思扬, 王红瑞, 来文立, 等. 中国能源耗水空间特征及其协调发展脱钩分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(5): 800-813.
Hong Siyang, Wang Hongrui, Lai Wenli, et al. Spatial analysis and coordinated development decoupling analysis of energy-consumption water in china[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(5): 800-813.
- [7] 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, 31(1): 114-123.
Xiang Xiaozhi, Jia Shaofeng. Estimation and trend analysis of water demand of energy industry in China[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(1): 114-123.
- [8] 刘欢, 贾仰文, 牛存稳. 区域水-能源资源的空间分布特征及匹配格局分析[J]. 水电能源科学, 2017, 35(6): 127-131, 158.
Liu Huan, Jia Yangwen, Niu Cunwen. Analyses of spatial distribution characteristic and matching pattern of regional water-energy resources[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(6): 127-131, 158.
- [9] 韩买良. 火力发电行业用水分析及对策[J]. 工业水处理, 2010, 30(2): 4-7.
Han Mailiang. Analysis and countermeasures on water consumption in thermal power plants[J]. Industrial Water Treatment, 2010, 30(2): 4-7.
- [10] 邱静, 黄本胜, 马瑞, 等. 滨海核电厂用水合理性分析[J]. 广东水利水电, 2010(10): 4-8.
Qiu Jing, Huang Bensheng, Ma Rui, et al. Rationality analysis of water utilization in a coastal nuclear power plant[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2010, (10): 4-8.
- [11] 孙婷, 张雨, 邵芳, 等. 中国工业用水定额理论与应用初探[J]. 中国水利, 2015(23): 46-48.
Sun Ting, Zhang Yu, Shao Fang, et al. Theory and application on quota of industrial water use in China[J]. China Water Resources, 2015(23): 46-48.
- [12] 杜玲, 王猛, 刘曦, 等. 河北平原区农作物种植水资源压力指数评价[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(7): 1-9.
Du Ling, Wang Meng, Liu Xi, et al. Evaluation of water resources pressure indexes based on crop cultivation in Hebei plain[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22 (7): 1-9.
- [13] 刘虹利, 左萍, 王红瑞, 等. 北京市工业用水效率和工业增长空间差异性分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, 49(Z1): 199-204.
Liu Hongli, Zuo Ping, Wang Hongrui, et al. Analysis on the spatial difference of industrial water use efficiency and industrial added value in Beijing[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2013, 49(Z1): 199-204.
- [14] 娄学萃. 世界能源资源的部门构成及空间分布特征[J]. 国外人文地理, 1988(1): 32-36.
Lou Xuecui. Sector composition and spatial distribution characteristics of energy resources in the world[J]. Human Geography, 1988(1): 32-36.
- [15] 车德竟, 孟洁, 陈永辉, 等. 未来20年中国火力发电用水情况预测分析[J]. 电力建设, 2013, 34(8): 17-21.
Che Dejing, Meng Jie, Chen Yonghui, et al. Predictive analysis of water usage for thermal power generation in next twenty years[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(8): 17-21.
- [16] 魏高升, 邢丽婧, 孟洁, 等. 中国火力发电用水情况预测及节水技术发展分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(32): 5717-5727.
Wei Gaosheng, Xing Lijing, Meng Jie, et al. Predictive on water usage and analysis on water conservation development in thermal power generation of china[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(32): 5717-5727.
- [17] 沈旭, 王建华, 李海红, 等. 基于水功能的火力发电厂用水效率评价方法研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2013, 11(1): 53-58.
Shen Xu, Wang Jianhua, Li Haihong, et al. Methodology of water-use efficiency assessment for thermal power plant based

- on the function of water[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013, 11(1): 53-58.
- [18] 宋轩, 耿雷华, 杜霞, 等. 中国火电工业取用水量及其定额分析[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(6): 64-66, 70.
Song Xuan, Geng Leihua, Du Xia, et al. Analysis of water intake quantity and quota in thermal power industry of China [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2008, 19(6): 64-66, 70.
- [19] 朱法君, 邬扬明. 浙江省各地市水资源压力指数评价[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(9): 14-16.
Zhu Fajun, Wu Yangming. Water resources pressure index assessment of cities in Zhejiang Province[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(9): 14-16, 28.
- [20] 廖乐, 吴宜进, 毕旭. 湖北省各主要地市水资源压力指数评价[J]. 环境保护科学, 2012, 38(3): 82-86, 94.
Liao Le, Wu Yijin, Bi Xu. Assessment of water resources pressure indexes of main cities in Hubei Province[J]. Environmental Protection Science, 2012, 38(3): 82-86, 94.
- [21] 钟锐, 赵鹏, 张宏伟, 等. 国际能源贸易中的能源隐含水流动及其对各国水资源影响[J]. 资源科学, 2014, 36(1): 103-109.
Zhong Rui, Zhao Peng, Zhang Hongwei, et al. Global embodied water flows in relation to energy trade and its effect on water resources[J]. Resources Science, 2014, 36(1): 103-109.
- [22] BP 公司. BP 世界能源展望 2018 版[EB/OL]. (2018-04-11) [2018-10-07]. https://www.bp.com/zh_cn/china/reports-and-publications/_bp_2018_html.
BP Group. BP energy outlook 2018[EB/OL]. (2018-04-11) [2018-10-07]. https://www.bp.com/zh_cn/china/reports-and-publications/_bp_2018_html.

Spatial distribution analysis on water withdrawal of main energy production in China

DONG Donglin¹, ZHANG Ruomeng¹, FU Jingying^{2,3}, LIN Gang¹

1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China
2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China
3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In this paper, we try to explore the relevance between energy production and water withdrawal by means of spatial autocorrelation analysis of water pressure index based on energy production in order to provide a reference for the optimal adjustment of energy structure and the sustainable development of energy and water in China. The results are as follows. At present, the high-productive areas of main energy production in China are mainly distributed in the north and east-central regions, with the energy production of 5 provinces such as Inner Mongolia and Shandong accounting for 67% of the total China's main energy production; low-productive areas appear in some provinces in the south and southwestern parts. There are differences between the spatial distributions of water withdrawal for the 5 kinds of main energy production, and basically the spatial distribution of water withdrawal for each kind is consistent with the regional distribution of energy itself. The high value areas of water pressure index based on energy production are mainly distributed in the central and northern parts of China. The spatial agglomeration analysis shows that the water pressure index based on energy production has obvious spatial concentration characteristics and the H-H concentration feature is significant.

Keywords energy structure; spatial differentiation; water pressure index based on energy production; spatial autocorrelation analysis ●



(责任编辑 祝叶华)