

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.05.021

中国水-能源纽带关系双向消耗核算研究

曾 萌^{1,2}, 张园园^{1,2}, 王红瑞^{1,2}, 杨亚锋^{1,2,3}, 洪思扬⁴, 赵 勇⁵

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 北京师范大学水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875;
3. 华北理工大学理学院, 河北 唐山 063210; 4. 广东省农业科学院农业经济与信息研究所, 广东 广州 510640;
5. 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 100048)

摘要:针对经济社会发展中水与能源的消耗问题,从水资源开发利用过程中的能耗与能源生产过程中的水耗两个角度进行双向的定量分析,并采用双向核算法估算了全国主要能源产业生产现状总用水量与水资源利用的总耗能量,厘清了水与能源之间的纽带关系。研究表明:水与能源之间存在着环环相扣的关系;6类能源中火力发电耗水量最大,水力发电次之,其后分别为原煤、原油、天然气,太阳能发电耗水量最小,2016年中国主要能源生产过程中耗水量约占全国用水总量的3.14%;水资源利用过程中地表水取水总能耗最大,非常规水源利用总能耗较小,2016年中国水资源利用过程中的能耗约占全国能源消耗总量的2.44%。

关键词:水-能源纽带关系;能源生产耗水量;水资源利用能耗;定额法;双向消耗核算

中图分类号: TV213.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2022)05-0159-07

Bidirectional consumption accounting of water-energy nexus in China // ZENG Meng^{1,2}, ZHANG Yuanyuan^{1,2}, WANG Hongrui^{1,2}, YANG Yafeng^{1,2,3}, HONG Siyang⁴, ZHAO Yong⁵ (1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China; 3. College of Science, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China; 4. Institute of Agricultural Economics and Information, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China; 5. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: Aiming at the consumption of water and energy in economic and social development, this paper makes a bidirectional quantitative analysis on the energy consumption in the process of water resources development and utilization and the water consumption in the process of energy production. A bidirectional accounting method was used to estimate the total water consumption in the current production situation of major energy industries and the total energy consumption in water resources utilization in China, and explore the relationship between water and energy. The results show that there is a close relationship between water and energy; water consumption in thermal power generation is the largest, followed by those in hydropower generation and production of raw coal, crude oil, and natural gas, and water consumption in solar power generation is the smallest, with the calculated result of the water consumption in main energy production processes accounting for about 3.14% of the total national water consumption in 2016; in the process of water resources utilization, energy consumption in surface water intaking is the largest, and that of unconventional water source processing and utilization is relatively small, with the calculated result of the energy consumption in water resources utilization in China accounting for about 2.44% of the total national energy consumption in 2016.

Key words: water-energy nexus; water consumption in energy production; energy consumption in water resources utilization; quota method; bidirectional consumption calculation

基金项目:国家自然科学基金(51879010);广州市科技计划(202201011166)

作者简介:曾萌(1996—),女,硕士研究生,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:1006219702@qq.com

通信作者:王红瑞(1963—),男,教授,博士,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:henrywang@bnu.edu.cn

水和能源是人类生存和发展过程中不可或缺的两类重要资源,前者作为基础性自然资源,对人类的生存起着基本保障作用;后者作为关键的战略资源,对国家安全及地区经济发展至关重要。随着社会经济的不断发展、全球气候变化引起的极端事件的频繁发生和人口的持续增加,对于水与能源的需求加剧^[1-3],水资源短缺和能源过度使用所产生的生态环境问题将成为阻碍未来社会发展的瓶颈。如何对水与能源合理配置,提高其利用效率,成为当下的热点话题。2014 年世界水日的宣传主题被确定为“水与能源”,反映出水与能源问题已经引发全球的关注^[4],因此,研究水-能源纽带关系及其双向消耗核算具有重要的意义。

水与能源的相关性由 Gleick^[5]于 1994 年首次提出,由此开展了一系列水-能源纽带关系的研究,主要包括经济关联与物理关联两个方面。前者指能源与水资源价格波动的相互影响;后者指能源开发利用中水资源消耗以及水资源开发利用中能源消耗的关系^[6-7]。在经济关联方面,Dale 等^[8]于 2008 年分析了加利福尼亚水资源和能源系统之间的联系,提出了气候变化对水资源和能源价格的影响,并评估了能源价格变化对水资源系统的影响;Maas 等^[9]于 2019 年定量分析了家庭用水和用电的交叉价格弹性,结果表明,如果将城市水价提高 10%,美国西南地区的总用电量每年将减少大约 130 万 MW。在物理关联方面,Mielke 等^[10]于 2010 年较全面地总结了原煤、原油、天然气及生物质能、太阳能、风能、地热能、水力等可再生能源在开采、加工、转换等一系列过程中的耗水量,具有代表性意义;2019 年,Nouri 等^[11]在总结了煤炭、天然气、水能、核能、风能、生物质能以及太阳能等不同发电方式用水强度的基础上,以美国加利福尼亚为例,根据不同发电技术的耗水强度数据建立数值模型,确定各种发电方案的取水量和耗水量及最优发电技术组合方式,从而使用水量降至最低。

对于能源开发过程中的水资源消耗研究,学者多采用定量分析法和综合评价法。Wang 等^[12]通过建立多地区投入产出模型,构建中国水-能源的复杂网络体系,模拟了不同能源组合情景下水资源的消耗情况;Li 等^[13]研究了 NDC (nationally determined contribution) 和 WBD2 (well below 2 degrees) 目标下用水约束对能源基地发展带来的影响,在 WBD2 模拟情景下预估 2050 年中国能源耗水量将达到 98 亿 m^3 ;Li 等^[14]基于投入产出法,从生产和消费两个维度分析了京津冀地区水-能源的纽带关系,研究结果表明,北京、天津和唐山的能源生产和消费耗水量

均为最大。对于水资源开发利用中的能源消耗研究,杨敏等^[15]将比能耗分析法与单元能耗分析法相结合,对污水厂不同处理工艺的能耗值进行了对比分析,结果表明,改进的脉冲曝气法具备显著的节能效果,能耗降幅可达 42.4%;Wang 等^[16]对农用地下水的能耗值进行了评估,发现陕西省的能耗值最大,为 $0.64 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,河南省的能耗值最低,为 $0.30 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$;高津京^[17]的研究表明,获取再生水等新型水源的耗电量远高于传统水源的耗电量,若保持现阶段的用水趋势不变,水资源开发利用的耗电量将逐年上升,至 2050 年耗电量将在原来的基础上增加 60%。

当下对于水-能源关系的研究多从能源耗水或水耗能源单向角度进行分析探讨,不能很好地反映出二者之间的纽带关系。基于此,本文从能源开发利用中的水资源消耗和水资源开发利用中的能源消耗两个角度进行双向消耗核算,探究水-能源的纽带关系,可为水-能源的协同发展与安全保障提供借鉴与参考。

1 中国水资源与能源概况

中国每年可更新的淡水资源量约为 2.81 万亿 m^3 ,占世界第 5 位,仅次于巴西、俄罗斯、加拿大和印度尼西亚,但是人均淡水占有水平却很低,约为世界平均水平的 34%^[18]。在平水年,中国逾 660 座城市中,近 400 个城市面临供水不足,110 个城市严重缺水,人口超过 100 万的 32 个大型城市中,30 个城市的用水需求无法得到满足。就目前的供水能力而言,中国每年供水缺口约为 300 亿~400 亿 m^3 ,在干旱年份供需矛盾更大。水质方面,由于中国在工业化发展前期和中期一直采用粗放型的发展模式,使水资源遭受严重污染。截至 2016 年,中国废污水排放总量为 765 亿 t,仍处于较高水平,且中国废水处理比例增长较慢,水环境污染使得本已紧张的用水形势更加严峻。

改革开放以来,中国经济一直保持快速增长的趋势,在这一过程中,能源起到了重要的支撑作用,同时也带来能源消费需求的不断扩大。根据《中国能源统计年鉴 2016》^[19]统计结果,中国 2016 年能源消费总量为 43.6 亿 t 标准煤,相较于 1978 年增加了 665%,占世界能源消费总量的 23%。基于中国经济发展进入新时代的现状,从新一轮产业变革的发展势头来看,未来一段时间内中国能源消费的需求还将进一步增长,到 2050 年世界占比可能高达 60%^[19]。长期以来,中国能源发展面临结构不合理的状况,以煤炭、石油、天然气等一次能源为主

导^[20],2016 年这 3 种能源消费总量占比达到 87.2%,远远高于世界平均水平。一方面,这些能源作为天然能源,在自然界中的储量是有限的,无法满足持续增长的人口以及经济发展的需求;另一方面,这些能源作为化石能源,在燃烧的过程中会产生大量的大气污染物,导致中国生态环境恶化,空气污染红色预警持续增加。为缓解能源危机,近些年来中国一直在强调发展可再生能源,但是依赖于化石能源的消费模式在短时间内不会发生明显改变。开发可再生能源,推广可再生能源利用技术,提高可再生能源利用量和消费比重是中国能源结构调整的重要内容。

2 中国水-能源双向消耗核算

近年来,中国经济平稳迅速增长,对世界经济增长的贡献率步步攀升,但是经济的迅猛发展往往伴随自然资源的过度消耗,水资源短缺与能源的过度消耗已成为地区经济发展的主要障碍。因此,计算中国能源生产过程中的水耗以及水资源利用过程中的能耗,厘清水-能源纽带关系,具有重要的现实意义^[21-23]。由于资料的有限性以及能源与水资源的多样性,本文采用定额法估算全国主要能源产业生产现状总用水量与水资源利用的总耗能量。

人类社会生活和生产中的 4 类主要能源为原煤、原油、天然气、火力发电,在对能源开采使用的过程中,几乎都离不开水资源的消耗。本文在搜集全国能源生产数据的基础上,结合行业用水定额,采用定额法对 4 类能源生产过程中的水耗进行核算,除此之外,太阳能发电、水力发电也在本文核算的范围内。对于水资源利用中的能源消耗量,根据各类水资源的特点,结合其开采和利用的过程及数据的完整性,主要核算地下水开采、地表水利用、供水及污水处理回用的能源消耗。

2.1 主要能源生产耗水量计算

能源产业用水量指的是在能源生产过程中直接消耗的水资源。原煤的水耗包括开采和洗选两部分;原油和天然气的水耗主要由开采和加工产生;火力发电的水耗是机组冷却所用的水资源,根据是否循环使用,分为循环冷却水和直流冷却水,不同形式下的耗水量有较大差异。北方地区由于水资源较为短缺,为缓解水资源供需矛盾,火力发电基本上采用循环冷却;南方地区由于水量丰富,大多采用直流冷却。但总体而言,我国大部分火力发电厂仍采用循环冷却的供水方式,因此,在计算火力发电过程中的耗水量时,均采用循环冷却方式的单位发电量用水量。太阳能发电的耗水主要指清洁和冷却所消耗的

水资源;水力发电本身并不耗水,其水耗主要来源于发电过程中的蒸发和水库下渗^[21]。考虑到水资源禀赋、生产工艺、政策等方面的影响,不同区域间的单位能源生产耗水量有较大差异,因此,以我国除西藏和港澳台以外的 30 个省级行政区(以下简称省区)作为基础单元,结合各省区行业用水定额(表 1)以及《中国能源统计年鉴 2016》中统计的能源生产量,核算能源耗水量。

定额法计算公式为

$$W_i = E_i q_i \quad (1)$$

式中: W_i 为第 i 类能源生产的耗水总量, m^3 ; E_i 为第 i 类能源的生产量, t ; q_i 为第 i 类能源生产用水定额, m^3/t 。

部分省区采煤、洗煤或原油开采和加工用水定额统计数据缺失,主要是由于该地区煤炭或石油的生产量较少,未将其纳入用水定额统计中。统计时发现,能源产量与用水定额存在一定的相关关系,总体来说,产量高的地区用水定额相对较低,所以计算时采用煤炭或原油产量相近地区的用水定额值。根据部分地区已有的天然气开采用水定额数据,计算天然气开采用水量时,缺失数据的地区采用天然气开采用水定额均值进行核算,均选用 $2.86 \text{ m}^3/\text{t}$ 的定额值。除火力发电外,水能、太阳能等自然能源发电耗水都包括在本文核算内,定额数值采用 Davies 等^[24-25]的成果,计算结果如图 1 所示。

由图 1 可知,在 6 类能源中,火力发电耗水量最大,水力发电次之,其次分别为原煤、原油、天然气,太阳能生产耗水量最小。从空间分布上看,原煤生产与火力发电的耗水量区域分布特征较为相似,主要是由于大多火力发电厂以煤炭作为一次能源产生热能,所以煤炭主产区,如内蒙古、新疆等地,火力发电量较大,相应的耗水量也比较大。虽然陕西煤炭生产量高,但大部分煤炭调往外省,火力发电量不高;广东和江苏虽然本地煤炭产量低,但为煤炭调入大省,所以这些省份原煤生产与火力发电耗水量空间分布不匹配。原油和天然气生产耗水量分布与能源分布差别较大,原油生产耗水量较大的地区主要为东北、西北地区以及山东、山西等省,天然气生产耗水量较大的地区则主要为中西部地区,这是因为不同地区原油和天然气用水定额相差不大,因此耗水总量主要由能源生产量决定。太阳能发电耗水量较大的地区多分布在内蒙古、新疆等西北地区,主要是因为西北地区日照充足,太阳辐射较强^[26],太阳能发电量大;水力发电耗水量分布则与水资源空间分布特征较为吻合,南方地区水资源充沛,水电站数量也较北方地区多,水力发电耗水量也呈现出南多

表 1 各地区能源生产用水定额

单位: m^3/t

Table 1 Water quota for energy production in different regions

unit: m^3/t

省 区	用水定额标准	采煤	洗煤	原油开采	原油加工	天然气开采
北 京	北京市主要行业用水定额(2001 年)	0.74				
天 津	DB 12/T 101—2003 天津市工业产品取水定额			3.82		
上 海	DB 31/T 478.16—2014 上海市主要工业产品用水定额及计算方法			0.76	1.90	
重 庆	第二批重庆市部分工业产品用水定额(2006 年)	1.20			1.50	
河 北	DB 13/T 1161.2—2009 河北省用水定额	0.70	0.23	0.90	1.50	4.50
山 西	DB 14/T 1049.1—2015 山西省用水定额	0.20	0.06	0.60 [*]		
辽 宁	DB 21/T 1237—2015 辽宁省行业用水定额	0.50	0.07	2.50	0.58	2.57
吉 林	DB 22/T 389—2010 吉林省用水定额	0.8 [*]	3.00	1.50	4.00	
黑龙江	DB 23/T 727—2010 黑龙江用水定额	0.30	0.10	2.80	1.20	2.60
江 苏	江苏省工业、服务业和生活用水定额(2014 年修订)	0.75	0.15	4.00	1.00	
浙 江	浙江省用(取)水定额(2015 年)				0.75	
安 徽	DB 34/T 629—2014 安徽省行业用水定额	0.50	0.20		0.75	
福 建	DB 35/T 772—2013 福建省行业用水定额	0.80	3.00	1.00	2.00	
江 西	DB 36/T 420—2011 江西省工业企业主要产品用水定额	0.54	0.46		2.00	
山 东	DB 37/1639—2010 山东省重点工业产品取水定额	0.36	0.13		1.50	
河 南	DB 41/T 385—2014 河南省工业与城镇生活用水定额	0.40	0.07	3.10	0.50	0.20
湖 北	湖北省工业与生活用水定额(修订)				1.60	
湖 南	DB 43/T 388—2014 湖南省用水定额	0.30	0.40		0.75	
广 东	DB 44/T 1461—2014 广东省用水定额	2.80 [*]		0.75		
海 南	海南省用水定额(征求意见稿)	1.00	0.30	6.00	0.75	2.00
四 川	DB 51T /2138—2016 四川省用水定额	0.60	0.13	4.00		2.50
贵 州	DB 52/T 725—2011 贵州省行业用水定额	0.80	0.23			5.00
云 南	DB 53/T 168—2013 云南省用水定额	0.70	0.40		3.00	
陕 西	DB 61/T 943—2014 陕西省行业用水定额	0.30	0.14	4.00	0.75	0.36
甘 肃	甘肃省行业用水定额(2017 年)	0.30	0.15	3.00	0.75	0.20
青 海	DB 63/T 1429—2015 青海省用水定额	0.40	0.15	2.00	0.75	0.20
内蒙古	DB 15/T 385—2015 内蒙古自治区行业用水定额	0.25	0.12	1.10	0.80	0.20
广 西	DB 45/T 678—2010 广西壮族自治区工业行业主要产品用水定额	0.30 [*]		1.50		
宁 夏	宁夏工业产品取水定额表	0.30	0.10	1.50	0.75	
新 疆	新疆维吾尔自治区工业用水定额(2007 年)	0.18	0.31	1.05	0.75	

注: * 表示省区定额的标准中未将采煤和洗煤或者原油开采和原油加工分类统计,仅提供了总和。

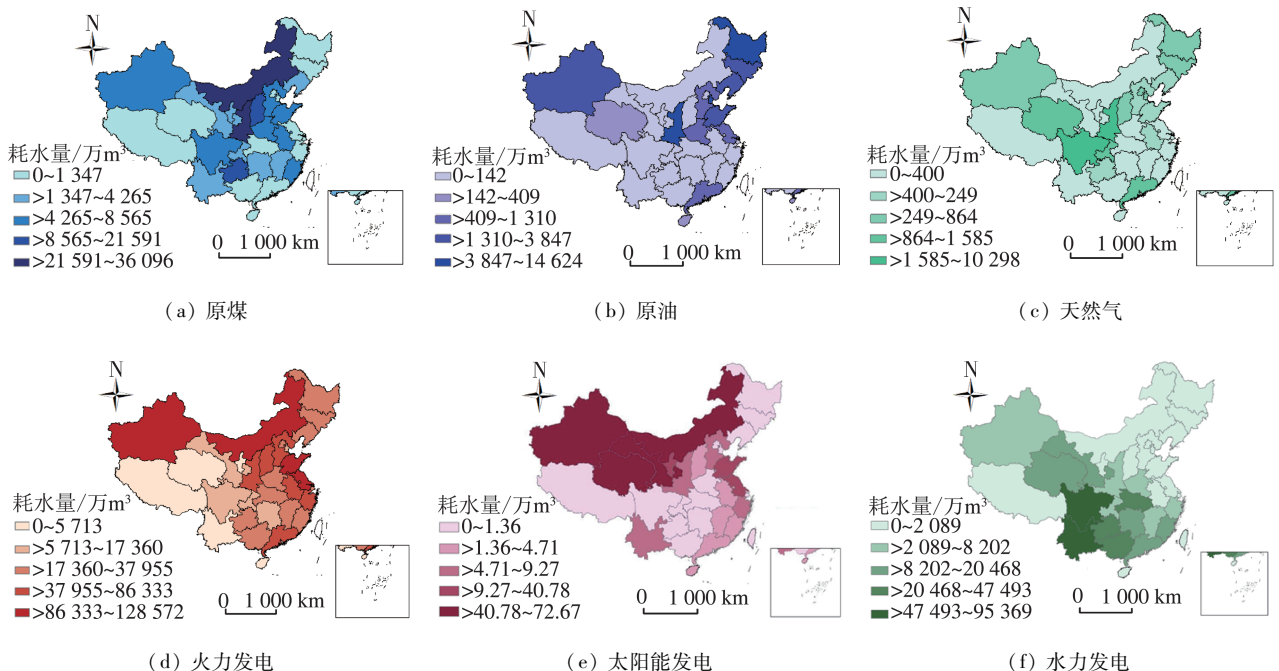


图 1 2016 年中国主要能源生产耗水量分布

Fig.1 Distributions of water consumption in main energy production in China in 2016

北少的特点。将以上 6 类能源耗水量相加,得出 2016 年中国主要能源产业耗水量约为 190 亿 m³。除了以上 6 类能源外,由于风能发电、核能发电耗水量少,且数据不全面,因此此次核算未包括在内;生物质能等可再生能源生产耗水量也比较大,但由于缺少统计数据,所以未计算该部分耗水量。

2.2 水资源利用能耗计算

水资源利用中的能耗计算应考虑取水和供水两部分内容,具体来说,包括地下水抽取、地表水的蓄水、引水、提水、调水过程,污水处理回用,自来水厂通过输水管道向用户供水等环节。由于计算时涉及环节较多,所需数据量大且难以获取,本研究通过查阅相关文献、统计年鉴等确定各环节的单位能耗值,计算结果较为粗略。

2.2.1 地下水抽取

地下水抽取耗能量取决于地下水埋深、水泵效率、抽取量等因素。Rothausen 等^[27]根据研究得出,当泵的工作效率达到 100% 时,将 1 m³ 的水提升 1 m 需消耗 0.002 73 kW · h 电能。Wang 等^[16]根据上述研究成果,在考虑水泵效率和用水效率的基础上,提出地下水抽取的能耗计算公式:

$$E_G = \frac{0.00273 V_1 h_1}{\eta_1 (1 - L)} \quad (2)$$

式中: E_G 为地下水抽取总耗能量, kW · h; V₁ 为抽水量, m³; h₁ 为抽水扬程, m; η₁ 为抽水设备的效率; L 为输电损耗(仅在电力设备计算时考虑)。

地下水抽取主要有以电动机、柴油机为动力机械带动水泵抽取和人工抽取 3 种方式,因此在计算时应从地下水抽取量中剔除人工取水量。以省区作为基础单元,根据《全国第一次水利普查公报》获取各省区人力井取水量,并假设 2016 年该值不变。在已有研究^[28]基础上,设机电井和柴油泵抽水量占比分别为 24% 和 76%,水泵效率分别为 40% 和 15%。根据《2016 中国电力年鉴》,估计电网系统的输电损耗为 7%。

通过查阅地下水动态公报,获取松辽平原、黄淮海平原、山西省及西北地区盆地和平原、江汉平原的地下水平均埋深值,共涉及 18 个省区,在计算这些地区的地下水抽取能耗时,地下水埋深采用平均值。其他省区地下水位数据通过《中国地质环境监测地下水位年鉴》获取,对分布在各省区的国家级地下水监测点利用 ArcGIS 进行空间插值,统计各地区的地下水平均埋深。各省区地下水利用量数据从 2016 年水资源公报中获取,如表 2 所示。依据式(2)计算出地下水取水能耗为 27.89 TW · h。

表 2 各省区地下水埋深与利用量
Table 2 Groundwater depth and amount of utilization in different provinces

省 区	地下水埋深/m	地下水利用量/亿 m ³	省 区	地下水埋深/m	地下水利用量/亿 m ³
黑龙江	8 ~ 50	166.8	青海	3.02 ~ 4.45	4.8
吉林	8 ~ 50	44.9	新疆	25.91	118.6
辽宁	8 ~ 50	57.0	湖北	4 ~ 8	8.8
北京	4 ~ 50	17.5	上海	8.42	0.03
天津	1 ~ 4	4.7	浙江	10.28	1.56
河北	1 ~ 12	125.0	江西	11.67	8.2
河南	1 ~ 12	119.8	福建	14.7	5.58
山东	1 ~ 8	82.3	湖南	7.2	15.23
江苏	0 ~ 4	8.9	广东	6.53	14.3
安徽	0 ~ 4	32.0	广西	7.46	11.5
山西	16.54	31.7	海南	17.1	2.92
内蒙古	8 ~ 50	88.8	重庆	23.97	1.35
陕西	2 ~ 50	33.3	四川	6.29	12.0
甘肃	2 ~ 50	24.8	贵州	9.62	3.06
宁夏	0.7 ~ 3.58	5.3	云南	15.71	3.72

2.2.2 地表水利用

在供水方面,地表水的蓄水过程是指利用水库或蓄水池储存水资源,引水则是指将水资源从蓄水处引入城市供水工程处,大多是利用重力势能从地势高的地区引到地势低的地区,因此,这两个环节能耗较小,可忽略不计。取水主要是利用水泵、水车等动力设备将水资源从河道、湖泊等地势低的地区提取到地势高的地区,能耗较大,采用以下公式^[29]计算:

$$E_T = \frac{\rho V_2 g h_2}{3.6 \times 10^6 \eta_2} \quad (3)$$

式中: E_T 为地表水提水总耗能, kW · h; ρ 为水的密度, kg/m³; V₂ 为取水量, m³; h₂ 为取水设备扬程, m; g 为重力加速度, m/s²; η₂ 为提水设备的效率, 一般取 0.75。

取水设备的扬程可近似为河床和地面的高程差,可根据各省区的地势条件取值,平原地区一般取 5 m,山区的取水高程远远大于平原地区,取平均值为 20 m。根据式(3)计算出地表水取水能耗为 35.66 TW · h。

调水工程是指跨越水资源一级区或独立流域的供水工程,中国的调水工程主要包括南水北调、引滦入津、引黄济青、引江济太、东深引水等工程。根据以往研究成果,中国单位长度(每 km)调水工程的单位输水能耗为 0.004 5 kW · h/m³,结合中国重点调水工程的调水量及输水长度等信息,最终计算出调水工程总能耗为 27.59 TW · h。

2.2.3 供水

供水过程包括两部分:处理和输配。由于各地区是以自来水厂为单位进行供水,原则上应获取各

自来水管的年耗电量,但是全国有 3 000 多座自来水处理设施,数据量太大,难以获取。因此,统计京津冀地区的北京市自来水集团、北京市石景山区自来水公司等 12 个规模较大的水厂用电情况与年供水量,将其耗电量平均值作为全国单位制水和输配水耗电量综合定额,平均值为 $0.374 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。考虑到自来水厂提供的自来水主要用于居民的生活,由此估算 2016 年中国常规水供水能耗总量为 $30.73 \text{ TW} \cdot \text{h}$ 。

据国家海洋局公布的数据,截至 2016 年底,全国应用反渗透技术的工程 111 个,产水规模 $792\,615 \text{ t/d}$,单位体积海水淡化耗电量为 $2.3 \sim 6.8 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$;应用低温多效技术的工程 16 个,产水规模 $369\,150 \text{ t/d}$,单位体积海水淡化耗电量为 $2.5 \sim 9.0 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$;应用多级闪蒸技术的工程 1 个,产水规模 $6\,000 \text{ t/d}$,单位体积海水淡化耗电量为 $2.5 \sim 4.4 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$;应用电渗析技术的工程 2 个,产水规模 300 t/d ,单位体积海水淡化耗电量为 $16.0 \sim 20.0 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ^[30]。最终计算得出中国 2016 年海水淡化能耗总量为 $1.01 \text{ TW} \cdot \text{h}$ 。

2.2.4 污水处理回用

Xie 等^[31]对中国 2009 年 1 856 个污水处理厂的能耗状况进行了统计,并对污水处理厂的规模及运行效率对能耗的影响进行了分析。结果表明,污水处理厂的平均能耗为 $0.254 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,且能耗随处理规模及运行负载率的提高而降低。而再生水回用与污水处理相比,能耗更大。参考世界资源研究所发布的报告^[32],单位再生水回用能耗值为 $0.82 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。通过查阅 2016 年《水资源管理年报》获取全国污水处理量及再生水回用量分别为 485.28 亿 m^3 和 82.48 亿 m^3 ,其对应的总能耗分别为 $12.33 \text{ TW} \cdot \text{h}$ 和 $6.76 \text{ TW} \cdot \text{h}$ 。

3 结 论

a. 中国 6 类主要能源生产的耗水情况为火力发电耗水量最大,水力发电次之,其后分别为原煤、原油、天然气生产,太阳能发电耗水量最小,2016 年中国主要能源生产过程中耗水量约为 190 亿 m^3 ,约占当年全国用水总量的 3.14%。

b. 将水资源划分为地表水、地下水、调水工程供水、海水淡化和再生水回用等类别,核算出 2016 年中国水资源利用过程中的能耗约为 $142 \text{ TW} \cdot \text{h}$,其中地表水取水总能耗最大,非常规水源利用总能耗较小。

c. 核算中国能源生产过程中耗水量时涵盖的能源种类需更加全面。除了以上 6 类能源外,生物

质能等可再生能源生产耗水量也比较大,未来随着此类数据的补充和更新,核算方法应不断细化和完善,从而得到更准确、全面的核算结果。

d. 采用定额法对中国能源生产过程中耗水量和水资源利用过程中能耗的核算结果可为水资源和能源的合理配置提供参考。

参考文献:

[1] 左其亭,赵衡,马军霞. 水资源与经济社会和谐平衡研究[J]. 水利学报,2014,45(7):785-792. (ZUO Qiting, ZHAO Heng, MA Junxia. Study on harmony equilibrium between water resources and economic society development[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2014,45(7):785-792. (in Chinese))

[2] 韩宇平,阮本清. 水资源短缺风险经济损失评估研究[J]. 水利学报,2007,38(10):1253-1257. (HAN Yuping, RUAN Benqing. Economic loss assessment of shortage risk of water resources[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2007,38(10):1253-1257. (in Chinese))

[3] 姜文来. 应对我国水资源问题适应性战略研究[J]. 科学与社会,2010(2):24-29. (JIANG Wenlai. Research on adaptive strategy to deal with China's water resources problems [J]. Science and Society, 2010(2):24-29. (in Chinese))

[4] SRINIVASAN R. International World Water Day 2014, focus: water-energy nexus[J]. Current Science,2014,106(7):911-912.

[5] GLEICK P H. Water and energy[J]. Annual Review of Energy and the Environment,1994,19:267-299.

[6] 顾阿伦,姜冬梅,张月. 能源-水关系研究现状及对我国的启示[J]. 生态经济,2016(7):20-23. (GU Alun, JIANG Dongmei,ZHANG Yue. Research status of energy-water relationship and its enlightenment to China [J]. Ecological Economy,2016(7):20-23. (in Chinese))

[7] 孙才志,郝帅,赵良仕. 中国水资源-能源-粮食纽带系统效率时空分异特征[J]. 水资源保护,2021,37(1):61-68. (SUN Caizhi,HAO Shuai,ZHAO Liangshi. Spatial-temporal differentiation characteristics of water resources-energy-food nexus system efficiency in China [J]. Water Resources Protection,2021,37(1):61-68. (in Chinese))

[8] DALE L,FUJITA K S,HANEMANN W M. The interaction of water and energy in California: climate change and price impacts [R/OL]. (2008-06-12) [2021-07-01]. <http://www.circleofblue.org/wp-content/uploads/2010/08/The-interaction-of-energy-and-water-in-California.pdf>, 2008.

[9] MAAS A, GOEMANS C, MANNING D T, et al. Complements of the house: estimating demand-side linkages between residential water and electricity [J]. Water Resources & Economics,2019,29:100140

- [10] MIELKE E, ANADON L D, NARAYANAMURTI V. Water consumption of energy resource extraction, processing, and conversion [R]. Cambridge: Harvard Kennedy School, 2010.
- [11] NOURI N, BALALI F, NASIRI A, et al. Water withdrawal and consumption reduction for electrical energy generation systems[J]. Applied Energy, 2019, 248: 196-206.
- [12] WANG S, FATH B, CHEN B. Energy-water nexus under energy mix scenarios using input-output and ecological network analyses[J]. Applied Energy, 2019, 233-234: 827-839.
- [13] LI N, CHEN W. Energy-water nexus in China's energy bases: from the Paris Agreement to the well below 2 degrees target[J]. Energy, 2019, 166(1): 277-286.
- [14] LI X, YANG L, ZHENG H, et al. City-level water-energy nexus in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Applied Energy, 2019, 235: 827-834.
- [15] 杨敏, 李亚明, 魏源送, 等. 大型再生水厂不同污水处理工艺的能耗比较与节能途径[J]. 环境科学, 2015, 36(6): 2203-2209. (YANG Min, LI Yaming, WEI Yuansong, et al. Energy consumption comparison and energy saving approaches for different wastewater treatment processes in a large-scale reclaimed water plant [J]. Environmental Science, 2015, 36(6): 2203-2209. (in Chinese))
- [16] WANG J, ROTHAUSEN S G S A, CONWAY D, et al. China's water-energy nexus: greenhouse-gas emissions from groundwater use for agriculture [J]. Environmental Research Letters, 2012, 7(1): 14035-14044.
- [17] 高津京. 我国水资源利用与电力生产关联分析[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [18] JIANG Y. China's water scarcity [J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(11): 3185-3196.
- [19] 韩玥. 基于能源消费、经济增长与碳排放关系研究的能源政策探讨[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- [20] 洪思扬, 王红瑞, 来文立, 等. 我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. (in Chinese))
- [21] HONG S, YANG H, WANG H, et al. Water and energy circulation characteristics and their impacts on water stress at the provincial level in China [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2021, 35(1): 1-18.
- [22] 姜珊, 赵勇, 尚毅梓, 等. 中国煤炭基地水与能源协同发展评估[J]. 水电能源科学, 2016, 34(11): 40-43. (JIANG Shan, ZHAO Yong, SHANG Yizi, et al. Evaluation of coordinated development of water and energy in China's coal bases [J]. Hydropower and Energy Science, 2016, 34(11): 40-43. (in Chinese))
- [23] 王雨, 王会肖, 杨雅雪, 等. 黑龙江省水-能源-粮食系统动力学模拟[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(4): 8-15. (WANG Yu, WANG Huixiao, YANG Yaxue, et al. System dynamics simulation of WEF nexus in Heilongjiang Province [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(4): 8-15. (in Chinese))
- [24] DAVIES E G R, KYLE P, EDMONDS J A. An integrated assessment of global and regional water demands for electricity generation to 2095 [J]. Advances in Water Resources, 2013, 52: 296-313.
- [25] 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.
- [26] ZHAO Z, WANG H, WANG C, et al. Changes in reference evapotranspiration over Northwest China from 1957 to 2018: variation characteristics, cause analysis and relationships with atmospheric circulation[J]. Agricultural Water Management, 2020, 231: 105958.
- [27] ROTHAUSEN S, CONWAY D. Greenhouse-gas emissions from energy use in the water sector [J]. Nature Climate Change, 2011, 1(4): 210-219.
- [28] ZOU X X, LI Y E, LI K, et al. Greenhouse gas emissions from agricultural irrigation in China [J]. Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change, 2015, 20(2): 295-315.
- [29] LI X, LIU J, ZHENG C, et al. Energy for water utilization in China and policy implications for integrated planning [J]. International Journal of Water Resour Development, 2016, 32(3): 477-494.
- [30] Committee on Advancing Desalination Technology, Water Science and Technology Board, Division on Earth and Life Studies, et al. Desalination: a national perspective [M]. Washington, D. C.: National Academies Press, 2008.
- [31] XIE T, DONG L, ZHANG F, et al. Energy saving and consumption reducing for the improved A ~ 2/0 process in a small or medium wastewater treatment plant in the northeast of China [J]. Industrial Water Treatment, 2014, 34: 84-86.
- [32] 温华, 钟丽锦, 付晓天, 等. 城市水源选择的水-能源关联分析: 以青岛为例 [R]. 北京: 世界资源研究所, 2014.

(收稿日期: 2021-08-03 编辑: 施业)