

中国新能源制氢潜力评价研究

——基于 31 省份 2017 年和 2030 年的分析

黄元生 刘诗剑¹

(华北电力大学 经济与管理学院, 北京 102206)

【摘要】: 使用 SBM-Undesirable 模型测算我国 31 省份的新能源制氢效率, 从新能源制氢效率和新能源装机容量两个维度构建评价体系, 再应用熵权评价法, 对我国 31 省份的新能源制氢潜力进行分析, 同时研究了新能源制氢潜力 2017—2030 年的变化情况。结果表明: 风电制氢的效率明显高于光伏制氢; 西北和华北地区的新能源制氢潜力明显高于其他地区; 西北和华南地区存在新能源制氢潜力与加氢设施建设之间短期发展不均衡的现象; 2030 年我国各省份新能源制氢效率和潜力较 2017 年都有所提升。最后, 依据评价结果提出改善我国氢能产业发展的对策建议。

【关键词】: 新能源制氢 潜力评价 熵权评价法

【中图分类号】: F206; F062.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2021)03-074-06

近年来, 越来越多的国家把新能源制氢作为促进大规模新能源消纳, 建设更深层次低碳化能源市场的重要措施^[1]。在 2019 年的《政府工作报告》中, 氢能首次被确定为中国未来能源发展的重点关注对象^[2]。制氢环节是实现氢能全产业链清洁化的关键, 也是大规模发展氢能的前提。新能源制氢技术利用电解槽将不易存储的电力转换成多用途高密度的氢气。与传统的煤制氢和天然气制氢相比, 新能源制氢具有低碳环保的特点^[3]。此外, 电解槽具有在不稳定电能条件下安全可靠制氢的能力, 特别适合与风电、光伏等间歇性电源综合开发利用, 从而缓解大规模风电、光伏上网“瓶颈”问题^[4]。我国新能源制氢尚处于示范阶段, 河北、山西等地区正在探索开展新能源制氢项目。因此, 如何科学、全面地对中国新能源制氢潜力的现状与未来发展进行评价, 厘清各省份在新能源制氢方面的优势和不足, 并提出针对性政策建议, 对于推进氢能产业高质量发展, 最大限度地消纳风电和光伏, 加快能源结构转型升级, 具有重要的现实价值。

从现有文献来看, 国内外学者从不同角度对新能源制氢技术进行了研究。如蔡国伟等^[5]结合中国的能源战略和电力发展现状, 对风电与电解水制氢的综合开发利用在中国的发展潜力和应用形式进行了探讨; Burhan 等^[6]利用天气数据对屋顶光伏制氢系统的性能进行研究; Li 等^[7]根据日本九州市电力负荷与发电量的历史数据, 研究电解水制氢的潜力并对其进行敏感性分析; Timmerberg & Kaltschmitt^[8]提出一种中欧地区能源进口的方案: 将南非地区可再生能源制得的氢气通过天然气管道运输到中欧地区, 并分析其潜力和成本; 谢欣烁等^[9]从生命周期的角度对风电制氢和光伏的成本、碳排放量和能耗进行研究。

针对制氢技术的评价方法, 现有文献集中在层次分析法。如 Acar 等^[10]从可持续性的角度, 采用犹豫模糊层次分析法对不同制氢技术进行评价研究; Chung 等^[11]应用层次分析法寻找韩国近期、中期和远期最优的制氢技术路线。然而以上文献未考虑新能源制氢效率对我国各省份制氢产业的影响, 更无法明晰我国各省域内新能源制氢资源的差异。基于效率和平等原则, 本文通过效率型指标和资源型指标构建我国新能源制氢潜力评价指标体系。对于效率型指标, 数据包络法 (DEA) 是一种典型的效率评价方法, 并

作者简介: 黄元生, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电力市场、能源评价。E-mail: hys2656@aliyun.com

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目“基于系统动力学的四川弃水治理问题研究”(2018QN095)

运用在能源效率和土地效率的评价中。如闫庆友和陶杰^[12]运用 DEA 模型对中国不同地区的生物质能发电厂的发电效率进行评价；杨清可等^[13]在考虑非期望产出的情况下，采用 SBM-undesirable 模型对长三角地区 16 城市的土地利用效率进行评价；Wu 等^[14]基于 2006—2009 年的数据，采用 DEA 模型对中国 30 个行政区域（香港、澳门、台湾、西藏除外）的能源利用效率进行了研究。除了遵循效率原则外，中国新能源制氢潜力评价还应考虑资源型指标，如风电装机容量和光伏装机容量。熵权评价法可以测量信息集中的不确定性或无序性^[15]，已有学者在包含效率型和资源型指标的评价体系中采用熵权评价法进行研究。如 Kong 等^[16]将二氧化碳排放效率当作效率指标，人口和历史碳排放量当作资源型指标，应用熵权评价法对中国各省份 2015 年和 2030 年的碳排放分配额进行评价。

随着新能源和电解水制氢技术的快速发展，新能源制氢有望在未来的氢能供给中成为有效主体，综合评价我国各省份新能源制氢潜力的现状与未来发展，对于制氢行业清洁化转型具有重要意义。鉴于此，本文以我国 31 省份（港澳台地区除外，下同）为研究样本，首先使用 SBM-undesirable 模型对新能源制氢效率进行测算；其次，从风电制氢效率、光伏制氢效率、风电装机容量和光伏装机容量四种指标构建评价指标体系，应用熵权评价法对我国 2017 年和 2030 年新能源制氢潜力进行科学、系统的评估与分析；最后，为政府部门发展氢能提供对策与建议。

1 研究方法

1.1 SBM-undesirable 模型

数据包络分析是一种对多个决策单元 (DMU) 之间的相对效率进行评估的方法，特别是 DMU 具有多个投入指标和多个产出指标的情况。在传统的数据包络模型中，DMU 有效的定义是在投入不变的条件下使产出达到最大，或者在产出不变的条件下使投入达到最小。而一旦涉及环境效率，就需要将生产过程中产生的污染物作为变量之一进行考虑，即在投入不变的条件下不仅使产出达到最大，并且使污染物最小。

在考虑非期望产出的情况下，本文采用 SBM-undesirable 模型^[17]。与传统的数据包络模型不同，该模型是基于非径向和非角度的，并且将松弛变量加入目标函数中，这种做法既可以优化投入产出中松弛性的问题，又可以解决效率评价过程中非期望产出的问题。

假设有 n 个 DMU，每一个 DMU 均有 m 种投入、 s 种期望产出和 z 种非期望产出。用向量的形式表示这三种变量，分别是 $x \in R_m$ ， $y^g \in R_s$ ， $y^b \in R_z$ ，用矩阵的形式表示不同 DMU 中的三种变量，则为 $X = (x_{ij}) \in R_{m \times n}$ ， $Y^g = (y_{ij}^g) \in R_{s \times n}$ ， $Y^b = (y_{ij}^b) \in R_{z \times n}$ 。该模型构建如下：

$$\rho^* = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{s_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{r=1}^{s_2} \frac{s_r^b}{y_{r0}^b} \right)} \quad (1)$$

$$s.t. \begin{cases} x_0 = X\lambda + s^- \\ y_0^g = Y^g\lambda - s^g \\ y_0^b = Y^b\lambda + s^b \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \\ s^- \geq 0, s^g \geq 0, s^b \geq 0, \lambda \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中： s^- 、 s^e 、 s^b 分别为表示投入松弛变量、期望产出松弛变量和非期望产出松弛变量， x_0 、 x_1^e 、 x_2^b 分别表示被评价决策单位的投入指标、期望产出指标和非期望产出指标， λ 为权重向量。目标函数 ρ^* 是严格递减的，且在 $0 \sim 1$ 之间，当 $\rho^*=1$ ，且 $s^-=0$ ， $s^e=0$ ， $s^b=0$ 时，决策单元才是有效率的；当 $\rho^*<1$ 或 3 种松弛变量中至少一个不为 0 时，决策单元是无效率的，存在着改进投入产出的必要性。

1.2 熵权评价法

熵权评价法是一种客观的赋予权重的方法，其核心是基于每个指标的离散程度确定权重。因此，该方法能避免主观因素的干扰。假设有 k 个评价对象，每个评价对象有 l 种评价指标，用 x_{ij} ($i=1, \dots, k; j=1, \dots, l$) 表示第 i 个评价对象中的第 j 个指标。熵权评价法的实现步骤如下：

(1) 数据标准化。由于各项数据的计量单位并不统一，因此在使用它们计算综合指标前，先要进行标准化处理，即把数据的绝对值转化为相对值，从而解决各项不同质数据值的同质化问题。本文选择的指标都属于正向指标，因此，对于所有指标采用的数据标准化如下：

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (3)$$

(2) 指标归一化。计算第 j 个指标下第 i 个评价对象的数据值占该指标的比重：

$$p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^k r_{ij}} \quad (4)$$

(3) 权重的计算。通过指标熵值计算每种指标的权重，具体公式如下：

$$e_j = -\ln(k)^{-1} \sum_{i=1}^k p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (5)$$

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^l (1 - e_j)} \quad (6)$$

(4) 计算第 i 个评价对象的熵权评价得分：

$$s_i = \sum_{j=1}^l w_j r_{ij} \quad (7)$$

2 中国新能源制氢潜力评价指标及数据来源

2.1 效率型指标

本文以 DEA 模型为理论基础,结合《中国氢能源及燃料电池产业白皮书》,参考 Acar^[10]、李静和马潇臻^[17]的研究成果,以 2017 年和 2030 年我国 31 省份的风电制氢和光伏制氢效率为评价对象,选取 SBM-undesirable 模型的指标如下:投入指标有制氢成本(元/千克)和能耗(焦耳/千克),期望产出有氢年产量(千克),非期望产出有碳排放量(克/千克氢气)。

(1) 氢年产量:

氢年产量表示一年内一个规模为 89.9 千克/小时的电解槽所制得的氢气质量。为体现不同地区新能源利用小时数的差异,本文将风电或光伏的年利用小时数当作电解槽的年利用小时数。其中,2017 年全国各地区的风电或光伏年利用小时数来源于国家能源局;2030 年全国各地区的风电或光伏年利用小时数在 2017 年的基础上加上弃风率或弃光率得到。

(2) 能耗:

能耗表示通过生命周期评价法计算出的生产 1 千克氢气所需要的能源消耗量。本文假设全国各地区的制氢能耗在同一时期相同,其中 2017 年的风电和光伏制氢的能耗数据来源于谢欣烁等^[9]研究成果中对应的中间值;2030 年的风电和光伏制氢的能耗数据来源于谢欣烁等^[9]研究成果中对应的最低值。

(3) 碳排放量:

碳排放量表示通过生命周期评价法计算出的生产 1 千克氢气所产生的碳排放量。本文假设全国各地区的制氢碳排放量在同一时期相同,其中 2017 年的风电和光伏制氢的碳排放量数据来源于谢欣烁等^[9]研究成果中对应的中间值;2030 年的风电和光伏制氢的碳排放量数据来源于谢欣烁等^[9]研究成果中对应的最低值。

(4) 制氢成本:

制氢成本表示生产 1 千克氢气所需要的成本。本文采用 Ayodele & Munda^[18]研究成果中电解水制氢的成本计算公式进行计算:

$$C = \frac{(C_1 + C_2 + C_3)}{MH} + C_E B \quad (8)$$

式中: C_1 表示电解水装置的投资成本,本文参考王周^[19]的研究成果将其设定为 14100000 元。 C_2 和 C_3 分别表示电解水装置的替换成本和运维成本,本文参考 Ayodele & Munda^[18]的研究成果将其分别设定为投资成本的 40%和 3%。 M 表示电解水装置的年产量。 H 表示电解水装置的生命周期,本文参考 Ayodele & Munda^[18]的研究成果将其设定为 20 年。 C_E 表示电解水装置使用的电力成本。2017 年全国各省份风电和光伏的发电成本数据来源于 2018 年度全国电力价格情况监管通报^[20];本文假设 2030 年全国各省份的风电成本和光伏成本分别是 2017 年的 50%和 40%,则 2030 年全国各省份风电平均发电成本为 0.29 元/千瓦时,光伏平均发电成本为 0.34 元/千瓦时,均小于 2017 年燃煤电价,这与我国政策要求风电和光伏“平价上网”的标准相吻合。 B 表示生产 1 千克氢气所需要的电量,2017 年的值取现有的电解槽技术水平,即 55.6 千瓦时/千克,随着电解槽技术的进步,2030 年的值下降到 44.5 千瓦时/千克。

2.2 资源型指标

对于新能源制氢潜力的评价,有两类指标至关重要,一类是效率型指标,如上文提到的风电制氢效率和光伏制氢效率,该类指标高的省份有更好的制氢效率,因此制氢潜力就会越大。另一类是资源型指标,如风电装机容量和光伏装机容量,由于中国幅员辽阔,新能源的资源分布在不同的省份是有区别的,该类指标能够反映新能源制氢所需要能源的丰富程度。

2017 年全国各省份风电装机容量和光伏装机容量的数据来源于《2018 中国电力年鉴》^[21]。根据国际可再生能源机构公布的中国可再生能源发展的路线图^[22],到 2030 年全国风电装机容量将会达到 573.51 吉瓦,光伏装机容量将会达到 409.65 吉瓦。对于 2030 年全国各省份风电装机容量,本文结合国际可再生能源机构的预测值和全国陆上风力发电资源区的划分,假设一类和二类风电资源区 2030 年的装机容量是 2017 年的 4 倍,三类和四类风电资源区 2030 年的装机容量是 2017 年的 3 倍。同时,考虑未来十年海上风电将会得到大力发展,将沿海 8 省份的海上风电装机规划也额外加入对应省份的风力装机容量中,从而得到 2030 年全国风电装机容量为 589.24 吉瓦。对于 2030 年全国各省份光伏装机容量,本文结合国际可再生能源机构的预测值和全国光伏发电资源区的划分,假设一类、二类和三类资源区 2030 年的发电量分别是 2017 年的 4 倍、3 倍和 2 倍,从而得到 2030 年全国光伏装机容量为 404.96 吉瓦。本文预测的 2030 年全国风电和光伏装机容量与国际可再生能源机构公布的数据比较接近,说明本文评价指标数据的合理性。

3 实证研究

3.1 新能源制氢效率评价

本文利用 SBM-undesirable 模型对 2017 年和 2030 年我国 31 省份的风电制氢效率和光伏制氢效率进行测算,其结果如表 1 所示。从制氢方式来看,在同一时期的同一地区,风电制氢的效率要明显高于光伏制氢。其原因主要有三点,一是与风电制氢相比,光伏制氢在能耗和碳排放量这两种指标方面具有明显的劣势,这与目前光伏电池板高能耗、高污染的制造工艺有着密切联系。二是过高的光伏发电成本导致光伏制氢的成本高于风电制氢。其中,2017 年全国平均风电制氢和光伏制氢的成本分别是 38.49 元/千克和 51.55 元/千克。随着新能源成本的持续下降,2030 年两种制氢方式的成本分别是 18.34 元/千克和 24.07 元/千克。从新能源制氢成本的变化情况来看,低电价是新能源制氢成本下降的主要驱动力。三是光伏制氢的年利用小时数远低于风电制氢,从而导致光伏制氢的年产量较低。对新能源制氢而言,除了低电价,高利用小时数也是影响新能源制氢效率的重要因素。

从具体省份的风电制氢效率来看,在 2017 年中云南、福建和河北的风电制氢效率位居 31 省份的前三;西藏、北京和甘肃的风电制氢效率排在最后三名。风电制氢效率低的原因是风电的电价过高以及年利用小时数偏低。从 2017 年和 2030 年风电制氢效率变化趋势来看,全国各省份的风电制氢效率都有所提高。其中,福建和云南的风电制氢效率在 2030 年达到 1,说明两省的风电制氢是有效率的,其他省份的风电制氢存在着投入产出上改进的必要性。甘肃的风电制氢效率增幅最大,其原因是在 2017 年中甘肃弃风率高,导致该省的风电利用小时数在 31 省份中最低;到了 2030 年新能源制氢已经初具规模,弃风现象大大减少,甘肃的风电制氢效率提高到全国中游水平。从具体省份的光伏制氢效率来看,海南、山东和黑龙江是光伏制氢效率最高的三个省;重庆、湖南和浙江的光伏制氢效率最低。2017 年和 2030 年光伏制氢效率的变化趋势与风电制氢效率类似。

表 1 中国各省份风电和光伏制氢效率

地区	2017 年风电制氢	2030 年风电制氢	2017 年光伏制氢	2030 年光伏制氢
安徽	0.416	0.750	0.108	0.247
北京	0.366	0.655	0.131	0.301
重庆	0.468	0.859	0.077	0.163
福建	0.503	1.000	0.103	0.235

甘肃	0.372	0.779	0.136	0.327
广东	0.393	0.778	0.101	0.231
广西	0.445	0.813	0.109	0.242
贵州	0.414	0.736	0.095	0.212
海南	0.395	0.725	0.198	0.412
河北	0.494	0.909	0.128	0.307
黑龙江	0.414	0.783	0.151	0.350
河南	0.375	0.666	0.136	0.305
湖北	0.419	0.757	0.112	0.245
湖南	0.424	0.768	0.093	0.208
内蒙古	0.469	0.905	0.149	0.357
江苏	0.398	0.736	0.096	0.257
江西	0.412	0.741	0.106	0.238
吉林	0.384	0.752	0.130	0.316
辽宁	0.435	0.811	0.142	0.327
宁夏	0.393	0.690	0.139	0.335
青海	0.412	0.721	0.135	0.329
山东	0.409	0.721	0.172	0.379
上海	0.383	0.702	0.134	0.307
山西	0.416	0.758	0.119	0.269
陕西	0.410	0.739	0.121	0.288
四川	0.468	0.863	0.100	0.224
天津	0.451	0.820	0.138	0.322
新疆	0.425	0.875	0.131	0.319
西藏	0.349	0.618	0.117	0.318
云南	0.545	1.000	0.108	0.306
浙江	0.407	0.752	0.093	0.247
平均值	0.421	0.780	0.123	0.288

3.2 中国新能源制氢潜力评价

基于上文风电制氢效率和光伏制氢效率的结果,本文进一步利用熵权评价法对中国 31 省份的新能源制氢潜力进行评价,四种指标的权重分别为 13.90%、16.60%、29.78%和 39.72%。2017 年和 2030 年全国各省的评价结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出,2017 年我国 31 省份的新能源制氢潜力可以分为三个档次:第一档只有 1 个省份,即内蒙古(0.217);第二档有 10 个省份,潜力值在 0.1 与 0.2 之间;第三档有 20 个省份,潜力值小于 0.1。与 2030 年全国新能源制氢潜力相比,2017 年的新能源制氢潜力明显偏低。其中,新能源制氢潜力较强的地区除了内蒙古,还有新疆(0.182)、山东(0.175)、河北(0.166)和甘肃(0.139);而西藏(0.022)、北京(0.028)、重庆(0.028)和上海(0.038)的新能源制氢潜力评价排在 31 省份的最后 4 名。

表 2 2017 年和 2030 年全国各省份潜力评价结果

地区	2017 年潜力评价结果	2030 年潜力评价结果
安徽	0.108	0.322
北京	0.028	0.168
重庆	0.028	0.154
福建	0.065	0.271
甘肃	0.139	0.642
广东	0.058	0.316
广西	0.048	0.212
贵州	0.047	0.191
海南	0.065	0.249
河北	0.166	0.583
黑龙江	0.075	0.261
河南	0.095	0.354
湖北	0.074	0.251
湖南	0.048	0.195
内蒙古	0.217	0.876
江苏	0.115	0.505
江西	0.069	0.239
吉林	0.061	0.284
辽宁	0.092	0.354

宁夏	0.121	0.488
青海	0.108	0.436
山东	0.175	0.626
上海	0.038	0.218
山西	0.113	0.377
陕西	0.078	0.311
四川	0.057	0.225
天津	0.056	0.227
新疆	0.182	0.790
西藏	0.022	0.172
云南	0.111	0.384
浙江	0.091	0.396
平均值	0.088	0.338

从表 2 中 2017 年和 2030 年新能源制氢潜力变化趋势来看,全国各省份的新能源制氢潜力水平有较大提升,平均潜力值从 2017 年的 0.088 提高到 2030 年的 0.338,并且所有省份的新能源制氢潜力都超过 0.1。其中,有 6 个省份的新能源制氢潜力超过 0.5,分别是内蒙古(0.876)、新疆(0.790)、甘肃(0.642)、山东(0.626)、河北(0.583)和江苏(0.505);有 20 个省份的新能源制氢潜力在 0.2 至 0.5 之间;其他小于 0.2 的省份分别是重庆(0.154)、北京(0.168)、西藏(0.172)、贵州(0.191)和湖南(0.195)。由于海上风电的大规模发展,沿海地区的新能源制氢潜力得到了较大的改善,如广东(从 2017 年的 0.058 增长到 2030 年的 0.316)、江苏(从 2017 年的 0.115 增长到 2030 年的 0.505)、上海(从 2017 年的 0.038 增长到 2030 年的 0.218)、山东(从 2017 年的 0.175 增长到 2030 年的 0.626)等。从全国范围来看,新能源制氢潜力将会不断提升,其原因在于上文提到的全国各省份的风电制氢效率和光伏制氢效率都有所提高。此外,氢能可推动新能源的加速部署,而新能源规模和装机比例的提高离不开氢能的储能作用。新能源和制氢产业相互促进发展的关系有利于新能源制氢潜力的改善。在熵权评价法中,评价指标包括效率型指标和资源型指标。在上文风电制氢效率排名靠前的云南和福建以及光伏制氢效率排名靠前的海南和黑龙江没有在新能源制氢潜力较强的省份中。

依据我国 31 省份新能源制氢潜力评价结果,以西北、华东、西南、东北、华北、华南和华中地区划分为依据,将区域内各省份的新能源制氢潜力平均值作为地区得分,得到我国七大地区新能源制氢潜力结果及现有加氢站数量,如表 3 所示。从七大区域来看,西北和华北地区的新能源制氢潜力明显高于其他 5 个地区,西南、华中和华南地区的新能源制氢潜力较为接近且较低。再结合现有加氢站数量分布来看,华南地区目前拥有全国最多的加氢站,但该地区新能源制氢潜力仅高于西南地区。在华南地区中,广东的新能源制氢潜力处于全国中游水平,但广西和海南的新能源制氢潜力较低。在 2017 年中华南地区与西南地区的新能源制氢潜力很接近,但华南地区位于沿海,可以在未来大力发展海上风电,从而使华南地区新能源制氢潜力的提升明显高于西南地区。西北地区的新能源制氢潜力最高,但是该地区目前缺少加氢基础设施。西北地区加氢设施建设较为欠缺、资本投入不足、氢能企业成果较少,氢能产业发展水平亟待提升。华东地区的新能源制氢潜力仅次于西北和华北地区,并且加氢站数量也在全国前列,氢能的供给侧和需求侧的发展协调度高。从全国范围来看,加氢站数量主要集中在沿海地区,虽然沿海地区可以发展海上风电,但受限于整体的新能源装机容量,新能源制氢潜力不如北方地区。因此,我国氢能的供给侧和需求侧存在一定的发展不协调现象。

表 3 中国七大地区新能源制氢潜力及加氢设施数据

地区	2017 年潜力得分	2030 年潜力得分	现有加氢站数量
西北地区	0.125	0.538	0
华东地区	0.093	0.372	9
西南地区	0.051	0.230	1
东北地区	0.074	0.309	1
华北地区	0.115	0.446	5
华南地区	0.056	0.257	9
华中地区	0.071	0.264	4

4 结论与政策建议

4.1 结论

本文以我国 31 省份为研究样本,首先在考虑非期望产出的情况下,应用 SBM-undesirable 模型对风电制氢效率和光伏制氢效率进行测算,再以新能源制氢效率和装机容量建立指标评价体系,应用熵权评价法对我国 2017 年和 2030 年新能源制氢潜力进行评价和分析,得出如下结论。

(1)从新能源制氢效率的评价结果来看,在同一时期的同一地区,风电制氢的效率要明显高于光伏制氢。随着新能源成本的下降和利用小时数的增加,新能源制氢的效率将会大幅提升。

(2)从新能源制氢潜力的评价结果来看,内蒙古、新疆、甘肃、山东、河北和江苏的新能源制氢潜力较高;而重庆、北京和西藏排名靠后。

(3)再结合加氢站数量分布来看,我国氢能的供给侧和需求侧存在一定的发展不协调现象。加氢站集中在沿海地区,但沿海地区新能源制氢潜力不如北方地区。

4.2 政策建议

(1)优化新能源与电解水制氢的综合开发利用。政府部门应着力提高新能源制氢技术、改善能源管理方法、促进新能源产业与制氢产业协调发展。具体而言:一方面,应降低新能源的发电成本,使氢能需求者的用氢成本不会太高;另一方面,应积极探索新能源与电解水制氢的综合开发利用这种新模型,鼓励新能源企业根据氢能的需求将部分新建的新能源项目专门用于电解水制氢,其余新能源项目的“弃电”用于电解水制氢的补充。此外,应改进光伏电池板的相关制造工艺,降低光伏制氢的能耗和二氧化碳排放量指标。

(2)华南和华东地区要继续做好我国加氢基础设施发展的领头羊,做好新能源制氢的规划。华南和华东地区的加氢基础设施建设起步早,但需要借助地区优势资源和产业发展特点发展氢能产业。特别是在高利用小时数的海上风电技术成熟后,就地利用

海水制氢能够提高该地区风电制氢效率,扩大该地区风电装机容量。

(3)西北和华北地区要充分发挥新能源制氢的巨大潜力优势,促进新能源制氢供给侧与需求侧的平衡发展。首先,政府部门要统筹规划新能源制氢产业布局,找准各省份新能源制氢发展定位;其次,积极探索氢能需求方面的应用,如在钢铁行业中替代焦炭或者建设长距离输氢管道。

参考文献:

- [1]Hosseini S E, Wahid M A. Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 57: 850-866.
- [2]2019 年政府工作报告[EB/OL]. (2019-03-05). <http://www.gov.cn/zhuanti/2019qglh/2019lhfgzbg/>.
- [3]中国氢能联盟. 中国氢能源及燃料电池产业白皮书[EB/OL]. (2019-11-05). https://www.sohu.com/a/324011929_825427.
- [4]孔令国. 风光氢综合能源系统优化配置与协调控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
- [5]蔡国伟, 孔令国, 薛宇, 等. 风氢耦合发电技术研究综述[J]. 电力系统自动化, 2014(21): 127-135.
- [6]Burhan M, Oh S J, Chua K JE, et al. Solar to hydrogen: Compact and cost effective CPV field for rooftop operation and hydrogen production[J]. Applied Energy, 2017, 194: 255-266.
- [7]Li Y X, Gao W J, Ruan Y J, et al. Potential and sensitivity analysis of long-term hydrogen production in resolving surplus RES generation—A case study in Japan[J]. Energy, 2019, 171: 1164-1172.
- [8]Timmerberg S, Kaltschmitt M. Hydrogen from renewables: Supply from North Africa to Central Europe as blend in existing pipelines—Potentials and costs[J]. Applied Energy, 2019, 237: 795-809.
- [9]谢欣烁, 杨卫娟, 施伟, 等. 制氢技术的生命周期评价研究进展[J]. 化工进展, 2018(6): 2147-2158.
- [10]Acar C, Beskese A, Temur G T, et al. Sustainability analysis of different hydrogen production options using hesitant fuzzy AHP[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(39): 18059-18076.
- [11]Chung Y H, Hong S J, Kim J. Which of the technologies for producing hydrogen is the most prospective in Korea?: Evaluating the competitive priority of those in near-, mid-, and long-term[J]. Energy Policy, 2014, 65: 115-125.
- [12]闫庆友, 陶杰. 中国生物质发电产业效率评价[J]. 运筹与管理, 2015(1): 173-178, 208.
- [13]杨清可, 段学军, 叶磊, 等. 基于 SBM-Undesirable 模型的城市土地利用效率评价——以长三角地区 16 城市为例[J]. 资源科学, 2014(4): 712-721.
- [14]Wu A, Cao Y, Liu B, et al. Energy efficiency evaluation for regions in China: An application of DEA and Malmquist

indices[J]. Energy Efficiency, 2014, 7 (3) :429-439.

[15]郭俊华, 程聪慧, 何军, 等. 基于熵权法的科技人才项目绩效评价研究——以上海市“浦江人才”计划为例[J]. 科技进步与对策, 2015(19) :119-125.

[16]Kong Y C, Zhao T, Yuan R, et al. Allocation of carbon emission quotas in Chinese provinces based on equality and efficiency principles[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 211:222-232.

[17]李静, 马潇臻. 资源与环境双重约束下的工业用水效率——基于 SBM-Undesirable 和 Meta-frontier 模型的实证研究[J]. 自然资源学报, 2014(6) :920-933.

[18]Ayodele T R, Munda J L. Potential and economic viability of green hydrogen production by water electrolysis using wind energy resources in South Africa[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(33) :17669-17687.

[19]王周. 天然气制氢、甲醇制氢与水电解制氢的经济性对比探讨[J]. 天然气技术与经济, 2016(6) :47-49, 83.

[20]国家能源局. 2018 年度全国电力价格情况监管通报[EB/OL]. (2019-11-05). http://www.nea.gov.cn/2019-11/05/c_138530255.htm.

[21]中国电力年鉴编委会. 2018 中国电力年鉴[M]. 北京:中国电力出版社, 2018.

[22]International Renewable Energy Agency. REmap 2030 Full Report[EB/OL]. (2019-11-05) <https://www.irena.org/publications/2014/Jun/REmap-2030-Full-Report>.