

“源-网-氢”三重博弈下的“真绿氢”研究

章寒冰¹，叶吉超¹，王慕宾¹，胡鑫威¹，付鑫²，孙小毛²

(1. 国网浙江省电力有限公司丽水供电公司，浙江丽水323000；2. 清华四川能源互联网研究院，四川成都610000)

摘要：可再生能源是“绿氢”的“源”，也是高比例清洁电力系统的“源”，源端供电强化了电网端制氢与源端制绿氢的减排博弈。综合考虑“源-网-氢”三端的耦合关系，论述网端制绿氢和源端供电的关系，阐述源端制氢和源端供电的减排差异，分析网端制氢和源端制氢的减排博弈。研究结果表明，现阶段源端制氢削弱了可再生能源的减排效果，而最大化发挥减排效果的“真绿氢”有赖于电力系统可再生能源电力比重的提高。

氢是全球能源系统脱碳的关键支柱之一，在全球终端能源消费总量中所占的份额不断增加：2020年氢和氢基燃料占比约为0.1%，到2030年和2050年将分别达到2%和10%[1]。氢能是我国能源结构由化石能源为主转向可再生能源为主的多元格局的关键媒介，是交通、工业和建筑等难以实现直接电气化部门的脱碳驱动力[2-4]，“氢经济”已经成为重要产业。根据中国氢能联盟估计，2050年我国氢气需求量接近6000万t[5-6]。

目前全球大约94%的氢来自于化石能源，其中由天然气、石油和煤炭制氢的比例分别为54%、31%和9%，绿氢占比不超过6%，国内绿氢更是仅占2%左右[7-8]，这导致在氢气的生产过程中排放了大量的CO₂。氢气生产必须变得比现在更清洁，才能支撑能源系统成功转型，因此，以可再生能源为基础的电力“绿氢”比重亟待提高[9-10]。

电力“绿氢”的核心是可再生能源电力，而可再生能源电力既可通过制“绿氢”实现制氢碳减排，也可用于供电替代区域电网电力实现电网碳减排。虽然现阶段区域电网制氢（网端制氢）综合碳排放是化石能源制氢过程碳排放的2~3倍[11]，但随着可再生能源并网装机的不断增加，电网供电碳排放强度将下降，高比例可再生能源的电力系统低碳/清洁制氢具有可行性。所以，电-氢能源系统作为重要的新型能源载体[12]，“绿氢”或“低碳氢”的未来是采用网端制氢还是可再生能源制氢（源端制氢）尚需探讨。

本文从区域电网制氢高碳排放的实质出发，分析区域电网制氢的敏感因素和区域电网低碳/清洁制氢的实施条件，阐述源端制氢和可再生能源供电的碳减排博弈关系，明确“真绿氢”发展前景。

1网端制氢现状

全国电网划分为华北、东北、华东、华中、西北、南方六大区域电网，且相对独立。根据《中国能源统计年鉴2020》测算[13]，南方电网、华中电网、西北电网、华东电网、东北电网和华北电网的供电碳排放强度依次增大，分别为0.412、0.446、0.627、0.643、0.820、0.852kgCO₂/(kW·h)。

根据《中国氢能发展报告2020》，目前电解水制氢的平均能耗为5kW·h/Nm³，传统煤气化制氢的碳排放强度约为19kgCO₂/kgH₂。

区域电网制氢的碳排放和煤制氢碳排放比较见图1，由图1可知，南方、华中、西北、华东、东北及华北电网的制氢碳排放强度依次为23.07、24.98、35.11、36.01、45.92

、47.71kgCO₂/kgH₂

，皆高于传统煤气化制氢的碳排放强度，其中华北电网的制氢碳排放强度最高，达到了传统煤气化制氢的2.5倍，南方电网制氢碳排放强度虽最低，但也高于传统煤气化制氢的1.2倍。综上所述，现阶段从加速碳中和的角度来讲区域电网制氢显然不可取。

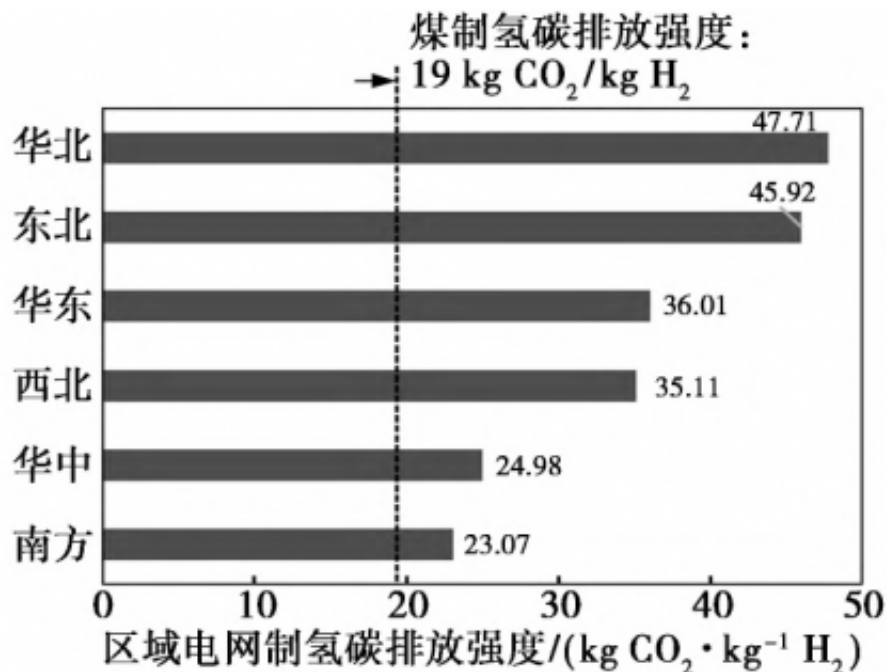


图 1 区域电网制氢的碳排放和
煤制氢碳排放比较

经过进一步分析发现，区域电网制氢的碳排放之所以高于煤制氢的碳排放，是由于电作为中间环节降低了能量转化效率。网端制氢和煤制氢碳排放

的比较见图2，在纯煤电系统中，煤发电的效率（ η_1

）约为35%[14]，电制氢的效率（ η_2

）为75%~85%[15-16]，所以煤→电→氢的整体效率低于30%，而煤→氢的效率为50%~60%，这意味着制备相同量的氢气，煤→电→氢消耗的煤更多，即碳排放量更多。在清洁电力比重为 δ （ $0 < \delta \leq 100\%$ ）的电力系统中，与纯煤电系统相比，发相同量的电消耗的煤量为纯煤电系统的（ $1 - \delta$ ），即碳排放量是纯煤电系统的（ $1 - \delta$ ）。换算为效率对碳排放量的影响来看，相当于煤（ $1 - \delta$ ）→电的效率在煤（100%）→电的基础上提高了 $1/(1 - \delta)$ ，此时煤（ $1 - \delta$ ）→电→氢的效率为：

$$\eta_0 = (35\% \times \eta_2) / (1 - \delta) \quad (1)$$

因为 $0 < \delta \leq 100\%$ ，所以增加清洁电力比重或提高电制氢效率，煤→电→氢的效率 η_0 随之增加，进而可超过煤直接制氢的效率，使区域电网制氢的碳排放强度低于煤制氢的碳排放强度。如煤制氢的效率取60%，电制氢的效率取85%，清洁电力比重 $\delta = 50.42\%$ 时，煤（ $1 - \delta$ ）→电→氢和煤→氢的效率相等。此外，随着煤电机组的升级改造，煤发电效率也会提高，从而使得区域电网制氢的碳排放强度等于煤制氢的碳排放强度，此时所需的清洁电力比重低于50.42%。当 $\delta = 100\%$ 时，也就是采用100%可再生能源电力系统时，网端制氢不再产生碳排放。

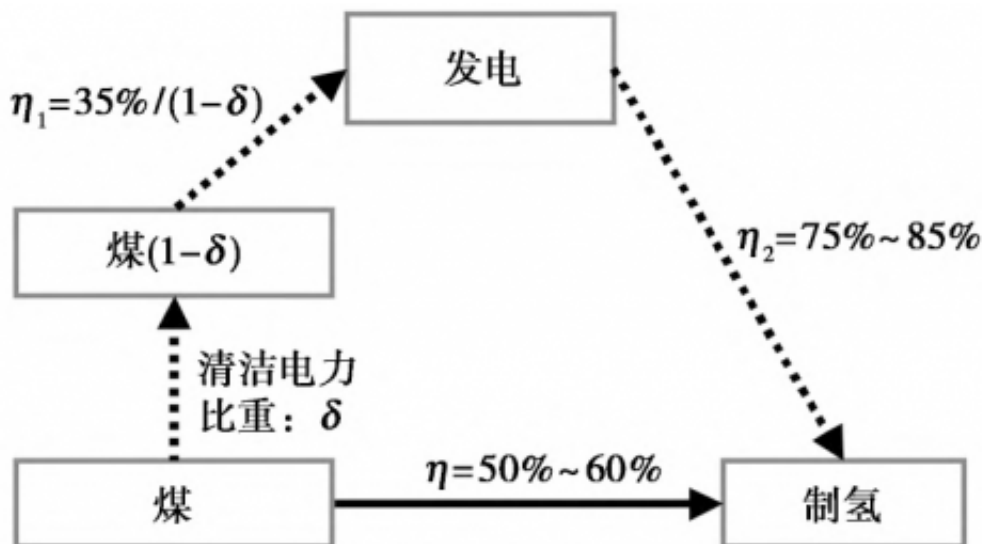


图2 网端制氢和煤制氢碳排放的比较

2网端制氢敏感因素

在2050年电解水制氢能耗预计降低至 $3.88 \text{ kW} \cdot \text{h} / \text{Nm}^3$ 。为比较区域电网制氢的碳排放强度对电解水制氢能耗和电网供电碳排放的敏感程度，将两者的变化范围定义为相同的区间长度：电耗范围取值为 $[4.01, 5]$ ， $4.01 \text{ kW} \cdot \text{h} / \text{Nm}^3 < 3.88 \text{ kW} \cdot \text{h} / \text{Nm}^3$ ，符合未来发展情况；区域电网供电碳排放强度取值为 $[0.01, 1]$ ：

$$C_{\text{grid}} = (EF_{\text{grid}} \times E_e) / \rho \quad (2)$$

式中： C_{grid} 为区域电网制氢碳排放强度， $\text{kg CO}_2 / \text{kg H}_2$ ；
 EF_{grid} 为区域电网供电碳排放强度， $\text{kg CO}_2 / (\text{kW} \cdot \text{h})$ ；
 E_e 为电解水制氢的电耗， $\text{kW} \cdot \text{h} / \text{Nm}^3$ ； ρ 为氢气的密度， 0.089 g/L 。

单位制氢碳排放强度与区域电网供电碳排放强度和电解水制氢电耗的关系见图3。由图3可知，随着区域电网供电碳排放强度和电耗的降低，区域电网制氢碳排放强度呈现下降的趋势。供电碳排放强度下降空间大，使得制氢碳排放呈现出较陡峭的下降趋势，下降空间可达100%；而电耗的下降幅度相对有限，对制氢碳排放影响空间较小，约在20%左右。所以，电网低碳制氢的关键是降低供电碳排放强度。

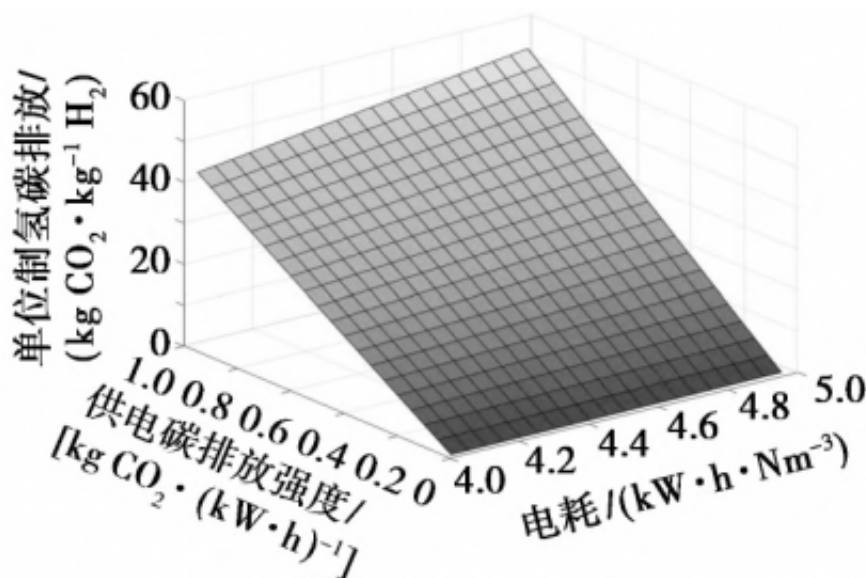


图 3 制氢碳排放强度与区域电网供电碳排放强度和电解水制氢电耗的关系

3网端制氢的前景

2020年12月，中国氢能联盟提出《低碳氢、清洁氢与可再生能源氢的标准与评价》团体标准[17]，首次通过标准形式对氢的碳排放进行量

化，标准指出，在单位氢气碳排放量方面，低

碳氢的阈值为 $14.51\text{kgCO}_2\text{e/kgH}_2$ ，清洁氢和可再生氢的阈值为 $4.9\text{kgCO}_2\text{e/kgH}_2$

。区域电网制氢现阶段要达到

低碳氢的标准，供电碳排放强度至少应降低至 0.259kgCO_2

$/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ，而要达到清洁氢标准，

供电碳排放强度至少要降低至 0.088kgCO_2

$/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。考虑到2050年电解水制氢能耗的降低，以目前供电碳排放强度最低的南方电网来看，区域电网制氢要达到低碳氢标准，供电碳排放强度也需要在当前的基础上降低约19%。区域电网供电碳排放强度的降低主要意味着清洁电力比重的提高，而在“碳达峰、碳中和”背景下，可再生能源电力的发展程度与低碳制氢的关系还需明确。

根据计算，区域电网2019年的火电碳排放强度（EFgrid-TP）如表1所示，在现阶段区域电网要达到低碳制氢的标准，清洁电力比重需要提高至68%以上，而要达到清洁制氢的标准，清洁电力比重则需要提高至89%以上。基于2019年各区域电网的清洁电力比重情况，要实现低碳制氢，南方、华中、西北、华东、东北、华北电网的清洁电力比重依次需要提升18.11%、22.03%、40.66%、47.14%、51.54%及60.75%；而要实现清洁制氢，清洁电力比重分别需要提升38.41%、42.18%、59.55%、68.18%、67.27%及78.27%。可见，南方电网由于巨大的水电优势，在低碳制氢方面最具发展潜力。

表 1 区域电网制氢达到低碳氢和清洁氢标准时的
清洁电力比重情况 %

区域	火电碳排放强度/ 电网 $[\text{kg CO}_2 \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	2019 年 清洁电力 比重	达到低碳制 氢所需清洁 电力比重	达到清洁制 氢所需清洁 电力比重
南方	0.843	51.15	69.26	89.56
华中	0.849	47.45	69.48	89.63
西北	0.905	30.73	71.39	90.28
华东	0.813	21.00	68.14	89.18
东北	1.087	24.63	76.17	91.90
华北	0.976	12.71	73.46	90.98

4多重博弈下制氢的未来

可再生能源电力包括水电、风电、光伏和核电等，以近些年发展最为迅速的光伏电力来分析可再生能源供电与制氢的碳减排博弈关系，来明确网端制氢和源端制氢的发展前景。

光伏制氢和光伏供电碳

减排效果的比较见图4。由图4可知，煤制氢的碳排

放约为 $19\text{kgCO}_2/\text{kgH}_2$

，而当下电解水制氢的能耗为 $5\text{kW} \cdot \text{h}/\text{Nm}^3$ ，通过换算可知，光伏制氢在替代煤制氢上碳减排强度（ α ）为 0.339kg CO_2

$/(\text{kW} \cdot \text{h})$ （源端碳减排强

度）；而光伏供电时碳减排强度（ β ）在 $0.412 \sim 0.852\text{kgC}$

O_2

$/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 范围内，与所在区域电网的供电碳排放强度一致。所以，现阶段光伏供电的碳减排效果是光伏制氢的 $1.2 \sim 2.5$ 倍，从加速碳中和的角度来看，推动光伏供电更有利于碳减排，即现阶段使用可再生能源电力制“绿氢”削弱了可再生能源的减排效果，其“绿氢”的美名是以变相增加电网企业的碳减排责任为代价而实现的。

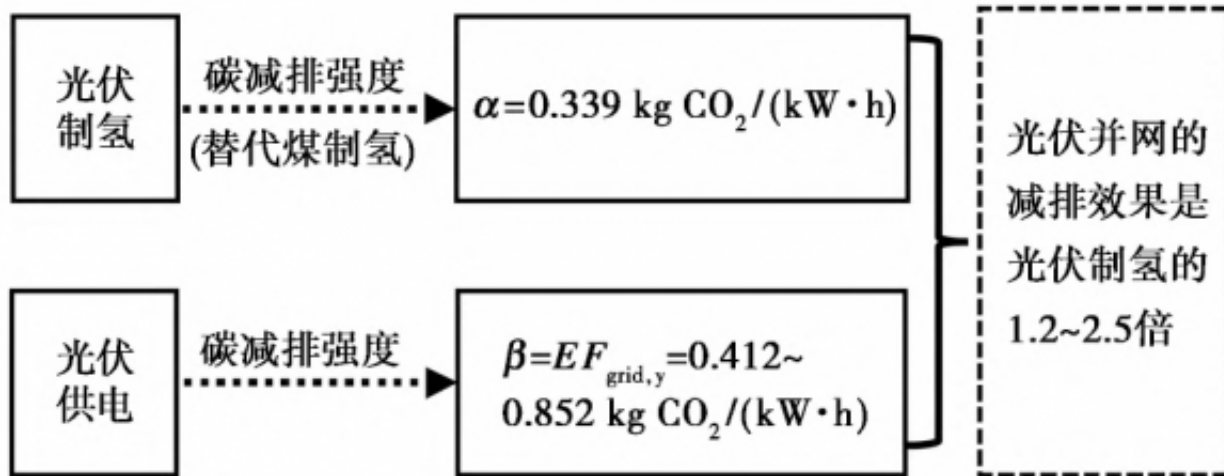


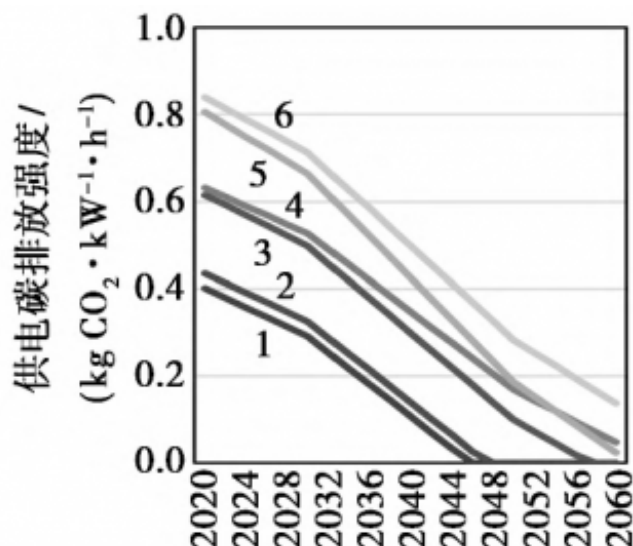
图4 光伏制氢和光伏供电碳减排效果的比较

因此，源端制氢要表现出减排优势，其源端碳减排强度应高于区域电网供电碳排放强度，将两者的差值称为比较碳排放强度。当比较碳排放强度为负值则表明源端制氢削弱了可再生能源电力的减排效果，为正值则表示源端制氢相较于供电更具减排优势。根据全球能源互联网发展合作组织2021年3月发布的《中国2060前碳中和研究报告》中提到的碳中和实现路线[18]，清洁能源比重2030年前需每年提高1.3%（ θ_1 ），2030—2050年每年需提高2.2%（ θ_2 ），2050—2060年每年需提高1.5%（ θ_3 ），将此作为碳中和的基准情景，那么源端制氢的比较碳减排强度为：

$$C_{\text{compare}} = \begin{cases} \alpha - EF_{\text{grid-TP}} \times (1 - \delta_{2019} + \sum_{i=2019}^n \theta_1) & 2019 < n \leq 2030 \\ \alpha - EF_{\text{grid-TP}} \times (1 - \delta_{2019} + \sum_{i=2019}^{2030} \theta_1 + \sum_{i=2030}^n \theta_2) & 2030 < n \leq 2050 \\ \alpha - EF_{\text{grid-TP}} \times (1 - \delta_{2019} + \sum_{i=2019}^{2030} \theta_1 + \sum_{i=2030}^{2050} \theta_2 + \sum_{i=2050}^n \theta_3) & 2050 < n \leq 2060 \end{cases} \quad (2)$$

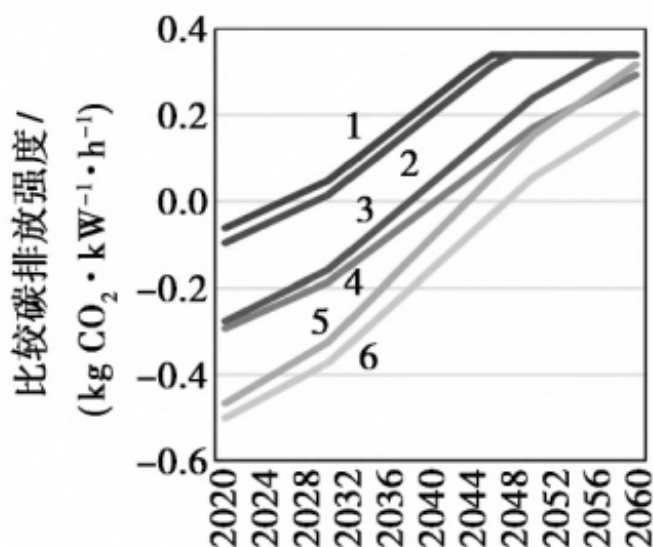
基准情景下区域电网供电碳排放强度变化和电耗为 $5\text{kW} \cdot \text{h}/\text{Nm}^3$ 时源端制氢的比较碳减排强度随时间的变化情况见图5。由图5可知，在基准情景下，随着可再生能源比重的增加区域电网供电碳排放强度下降，除华北电网外，其他五大电网的供电碳排放强度都能降至或接近0，而供电碳排放强度下降会削弱可再生能源供电的减排效果。当区域电网供电碳排放强度和源端碳减排强度相等时，可再生能源制氢或供电的碳减排博弈取得平衡。而要达到此条件，南方、华中、西北、华东、东北及华北电网约在2026、2030、2038、2042、2044和2048年才可实现。越过平衡点，供电碳排放强度随着清洁电力比重的增加进一步降低，区域电网制氢的碳排放强度将低于煤制氢的碳排放强度，比较碳排放

强度逐步增大，说明此时发展源端制氢更具碳减排优势。但同时，即使是在不考虑电解水制氢能耗降低的情形下，越过平衡点约5年后，六大区域具备低碳制氢的条件，而在越过平衡点约15年后，除华北电网外，其他区域电网制氢可实现清洁制氢。此时源端制氢与电网制低碳氢或清洁氢的减排博弈将逐步弱化。



1—南方; 2—华中; 3—西北; 4—华东; 5—东北; 6—华北

(a) 基准情景下区域电网供电碳排放强度变化



1—南方; 2—华中; 3—西北; 4—华东; 5—东北; 6—华北

(b) 电耗为 5 kW·h/Nm³时源端制氢的比较碳减排强度
随时间的变化

图 5 基准情景下区域电网供电碳排放强度
变化和电耗为 5 kW·h/Nm³时源端制氢的比较
碳减排强度随时间的变化

5结语

氢能是未来能源系统的重要组成成分,是多部门实现深度脱碳的关键手段。从“碳中和”的角度来看,清洁电力比重是区域电网实现低碳制氢或绿色制氢的关键因素,未来低碳/清洁氢能的规模化利用是可再生能源电力-源端制氢-区域网端制氢的三重博弈。根据区域差异,在未来几年甚至20余年内,可再生能源供电的减排能力强于源端制氢,现阶段源端制氢减排的实质是变相增加电力企业的碳减排责任。随着清洁电力比重的持续增长,部分区域源端制氢减排将在与供电减排的博弈中取胜,与此同时,区域电网也逐步显示出制备低碳氢或绿氢的能力,电网制氢和源端制氢减排博弈将逐步弱化。

参考文献

- [1] Remme U.Global hydrogen review 2021 [R].International Energy Agency,2021.<https://www.iea.org/reports/>.
- [2] Chinas accelerated decarbonization pathways economic benefits [R].Bloom Philanthropies, 2020. <https://www.bloomberg.org/publications/>.
- [3] Hydrogen economy outlook [R].Bloomberg NEF, 2020. <https://about.bnef.com/>.
- [4] 孟照鑫,何青,胡华为,等.我国氢能产业发展现状与思考[J].现代化工,2022,42(1):1-6.
- [5] 米树华.中国氢能源及燃料电池产业白皮书(2019版) [M].北京:中国氢能联盟,2019.

-
- [6] Blasio N D, Pflugmann F. Is China hydrogen economy coming? [M]. 2020.
- [7] 柏锁柱, 赵刚. 氢能事业的发展与前景展望 [J]. 石油石化节能, 2021, 11(8) : 43-46.
- [8] 徐冬, 孙楠楠, 张九天, 等. 通过耦合碳捕集、利用与封存实现低碳制氢的潜力分析 [J]. 热力发电, 2021, 50(10) : 53-61.
- [9] Dhahi A. Green hydrogen: A guide to policy making [M]. International Renewable Energy Agency, 2021. <https://www.irena.org/publications/>.
- [10] 张轩, 王凯, 樊昕晔, 等. 电解水制氢成本分析 [J]. 现代化工, 2021, 41(12) : 7-11.
- [11] 张永伟. 中国氢能产业发展报告 2020 [R]. 北京: 中国电动汽车百人会, 2020. <https://www.sdtzsb.com/Uploads/editor/6095e307b4c84.pdf/>.

- [12] 潘光胜,顾伟,张会岩,等.面向高比例可再生能源消纳的电氢能源系统[J].电力系统自动化,2020,44(23) : 1-10.
- [13] 国家统计局能源统计司.中国能源统计年鉴 2020 [M].北京: 中国统计出版社,2021.
- [14] 彭福银,彭疆南.氢能发展路线分析[J].低碳世界.2019,9(4) : 121-122.
- [15] 王东军,姜伟,赵仲阳,等.国内外工业化制氢技术的研究进展[J].工业催化,2018,26(5) : 26-30.
- [16] Chisholm G, Cronin L. Hydrogen from water electrolysis [M]. Storing Energy, 2016. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803440-8.00016-6/>.
- [17] 中国产学研合作促进会.T/CAB 0078—2020 低碳氢、清洁氢与可再生氢的标准与评价[S].中国产学研合作促进会,2020.
- [18] 全球能源互联网发展联合组织.中国 2060 年前碳中和研究报告[R].2021.<http://www.szguanxia.cn/article/1513/>. ■

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/214442.html>