

引用格式: 张明震, 张灿, 吴秀山, 等. 水资源对我国绿氢产业的影响分析 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(2): 172-178. ZHANG Mingzhen, ZHANG Can, WU Xiushan, et al. Analysis of the impact of water resources on china's green hydrogen industry [J]. Southern energy construction, 2024, 11(2): 172-178. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.17.

水资源对我国绿氢产业的影响分析

张明震^{1,✉}, 张灿², 吴秀山¹, 程前¹

(1. 中电建新能源集团股份有限公司新能源与储能研究院, 北京 100101;

2. 中国矿业大学(北京)管理学院, 北京 100086)

摘要: [目的] 文章旨在研究分析我国水资源对绿氢产业发展的影响, 揭示水资源与绿氢产业发展之间的矛盾, 分析绿氢产业未来发展趋势, 为我国可再生能源制氢项目发展布局提供有益参考。[方法] 为了证明水资源会在“三北”等地区限制我国绿氢产业发展, 结合实地调研情况和文献材料, 从水资源政策、传统化工产业用水和制氢技术等角度进行分析论证。[结果] 分析结果表明, 在我国水资源相关政策限制下, 绿氢产业布局应考虑水资源的制约, 大规模制取绿氢以及绿氢对化石能源制氢替代, 并不能有效节水, 反而会促进化工产业用水量增加; 在水资源制约下, 我国绿氢产业发展须从全局用水角度考虑布局, 并要充分结合既有化工产业的发展趋势, 同时应考虑海水等可利用的丰富资源。[结论] 我国绿氢产业发展不应忽略了既有政策框架、技术水平、产业布局和既有资源特性的问题, 布局绿氢项目时, 应充分考虑现状和未来趋势, 从全局谋划、产业协调发展、资源有效利用等角度考量, 解决水资源对绿氢产业的限制问题。

关键词: 绿氢; 水资源; 可再生能源制氢; 绿氢产业布局; 海水制氢

中图分类号: TK91; F426.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)02-0172-07

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.17

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Analysis of the Impact of Water Resources on China's Green Hydrogen Industry

ZHANG Mingzhen^{1,✉}, ZHANG Can², WU Xiushan¹, CHENG Qian¹

(1. Power China Renewable Energy Co., Ltd., New Energy and Storage Research Institute, Beijing 100101, China;

2. School of Management, China University of Mining and Technology - Beijing, Beijing 100086, China)

Abstract: [Introduction] The purpose of this paper is to research and analyze the influence of water resources on the development of the green hydrogen industry in China, reveal the contradiction between water resources and the development of green hydrogen industry, analyze the future development trend of the green hydrogen industry and to provide useful reference for the development layout of renewable energy hydrogen production projects in China. [Method] In order to prove that water resources could limit the development of the green hydrogen industry in "Northeast China, North China, Northwest China" and other areas, the analysis and the demonstration were made based on the field investigations and the documentary materials, considering water resources policies, water usage in traditional chemical industries, and hydrogen production technologies. [Result] The analysis results show that under the restriction of China's water resources-related policies, the layout of green hydrogen industry should consider the constraints of water resources, and the large-scale production of green hydrogen and its substitution for fossil energy hydrogen production cannot effectively save water. Instead, it may lead to an increase in water consumption by the chemical industry. Under the constraint of water resources, the development of China's green hydrogen industry must consider the layout from a holistic perspective, fully integrate the development trend of the existing chemical industry, and consider the abundant resources available such as seawater. [Conclusion] The development of the green hydrogen industry in China should not ignore the problems of existing policy framework, technology level, industrial layout and characteristics of

收稿日期: 2023-05-05 修回日期: 2023-06-25

基金项目: 中电建新能源集团股份有限公司新能源与储能研究院 2023 年科技项目“基于多因子分析的国内绿氢(氨)消纳路径研究”(2023-026)

existing resources. When arranging the layout of the green hydrogen projects, the current situation and future trends should be fully considered, and the problems posed by water resources on the green hydrogen industry should be solved from the perspective of the overall planning, the coordinated industrial development and the effective utilization of resources.

Key words: green hydrogen; water resources; renewable energy hydrogen production; green hydrogen industry layout; hydrogen production with seawater

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

在氢燃料电池汽车产业带动下,中国部分专家学者也从氢应用过程无碳排放、氢气单位质量能量密度高的角度积极支持氢气作为能源在我国发展^[1-2]。同时,在全球气候变暖的大背景下,美国、德国、日本、韩国等国以及欧盟地区均提出了发展氢能等清洁能源和实现碳中和的目标,中国也于 2020 年提出了碳达峰碳中和目标^[3],氢能的发展顺势进入爆发阶段。随着氢能产业链的日趋完善,源端低碳才能保证下游应用氢气的低碳也进一步成为氢能行业发展共识,我国氢能产业布局逐步从燃料电池汽车应用端转向可再生能源制氢端。因此,依托可再生能源电解水制氢成为中国氢能产业低碳发展的新阶段。可再生能源发电电解水制取的氢气在我国通常被称为绿氢,此类绿氢是水纯化除盐后,在催化剂作用下由电解槽电解得到;电解槽产生的氢气经过进一步纯化就形成了高纯度的绿氢,可在交通、工业等领域应用。

氢作为原料在工业领域应用成熟,用低碳清洁的氢气对传统化石能源制取的氢气进行替代,能够实现相应的产业全产业链或全生命周期低碳。特别是 2021 年下半年以来,中国氢能已不局限于交通领域应用,相关研究开始快速向工业用能和原料替代领域转移,这也进一步引起社会和行业对可再生能源电解水的重视。

纵观近期我国氢能的发展脉络,可再生能源制氢的提出,是基于氢储能特性而对能源结构的调整,旨在通过制氢缓解现阶段可再生能源发电的不稳定性,通过将可再生能源多余电力或者将低质量的电力以氢的形式进行存储,实现电力的充分消纳和高质量输出^[4]。在电力消纳方面,中国近几年可再生能源装机规模快速增加,既有电网通道和电网系统很

难实现高比例的绿电输送和消纳,且新建电网速度明显滞后,装机速度与消纳速度矛盾愈发凸显,虽然可再生能源的平均消纳水平较高,但局部地区的消纳水平仍较低,且随着装机规模的快速扩大,消纳比例不变的情况下,弃电规模也进一步扩大。为此,以内蒙古为主的“三北”地区加大了探索可再生能源制氢的力度,绿氢多种形式的示范项目近两年迅速增加。然而,以可再生能源制氢为主要氢源时,中国无论是工业用氢还是汽车领域用氢,相应的需求与供给市场都是分离状态,可再生能源丰富的地区集中在经济条件相对较差、地理位置相对偏远的“三北”和西南等地区,用氢的需求则集中于东部及南部沿海地区,这增加了绿氢的运输成本,进而提升了绿氢使用成本,用氢领域和用氢成本成为绿氢产业发展首要考虑因素。因此,绿氢交通、液态阳光、绿氢合成氨等绿氢就地消纳形式不断涌现。

1 中国绿氢产业的发展

绿氢在制取的过程中碳排放较低,是标准中认定的可再生氢,具有单位氢气二氧化碳排放量不超过 4.9 kg,消耗能源为风能、太阳能、水能、生物质能、地热能 and 海洋能等非化石能源的双重特点^[5]。我国的绿氢产业示范可追溯到“十一五”时期的 863 计划^[6],现阶段已在光伏制氢、生物质制氢以及光解水制氢等领域取得明显进步。

2021 年以来,中国绿氢产业在可再生能源开发的驱动下得以快速布局,不仅体现为已公开的 130 余个绿氢项目,还体现在关键装备电解槽领域^[7]。如 2021 年国内电解槽供货商仍以派瑞氢能、考克利尔竞立、天津大陆等企业为主,2023 年国内布局碱性电解槽的企业已达 200 余家,质子交换膜电解槽布局企业已达 10 余家,能源央企及风电、光伏企业均积极布局电解槽,并推出风光制氢一体化方案。

我国各省、市、自治区公布的绿氢项目不断增多,呈现风光制氢与化工耦合的发展趋势,炼化、合成氨、合成甲醇成为绿氢规模消纳的重要方式,新能源以及化工行业期望通过新建风光项目置换传统化工用氢方案实现新能源充分消纳和化工领域深度脱碳。但是,在项目实际落地中,也存在着一定的问题,如单个绿氢项目施工周期为 1~2 年,截至 2023 年一季度,还鲜有项目进入到实质性开工阶段。主要由于绿氢消纳仍缺少有效的商业模式、电解槽装备的技术成熟度有待进一步验证、绿氢项目实际运行对水资源有较强依赖等原因;其中,水资源的约束是带有政策性的强制约束条件,可以从非技术领域决定项目的成败,需在项目筹划之初就应审慎考虑。

2 绿氢产业的水资源制约

绿氢与水资源的关系离不开水资源政策、技术成熟度和产业结构。水是可再生能源制氢大规模发展的必要条件。水资源对绿氢项目的制约问题已在国际范围出现,如北非向欧洲出口大量绿色氢能,由于水资源短缺存在一定争议^[8],南澳大利亚一个 6 GW 的绿氢项目在 2022 年因供水问题而被取消^[9]。在中国可再生能源制氢快速发展的同时,气候变化带来的水资源供给问题也敲响了警钟,特别是 2022 年夏天,高温对我国重庆地区的生产生活造成了严重影响,公开报道有 66 条河流断流和 25 座水库干涸^[10],恶劣气候打破了人们对中国西南地区水资源丰富的传统认知。

绿氢是要解决环境问题,却也存在着对水资源环境的影响,绿氢发展必然要考虑资源节约与可持续发展问题。由于中国短期内公布的可再生能源制氢项目规模处于全球领先水平,中国将首先面对水资源对绿氢产业的制约问题。此外,在政策、技术和产业的多重因素影响下,水资源也将逐步成为全球氢能产业发展共同面临的问题。

2.1 中国具有严格的用水政策

2022 年 3 月 1 日,中国水利部和中国发展和改革委员会联合发布《“十四五”用水总量和强度双控目标》,“三北”地区用水总量较为严苛,特别是近期公布可再生能源制氢项目比较多的内蒙古自治区,其大部分城市处于水资源超载状况^[11],如表 1 所示。

表 1 中国“三北”地区各省、自治区、直辖市“十四五”用水总量和强度双控目标^[12]

Tab. 1 Double control targets for total water consumption and intensity in the “14th Five-Year” Plan for each province, autonomous region and municipality directly under the central government in “Northeast China, North China, Northwest China”^[12]

行政区	用水总量/亿m ³	万元国内生产总值用水量比 2020年下降/%	万元工业增加值用水量比 2020年下降/%
北京	42.5	10.0	10.0
天津	35.0	10.0	10.0
河北	206.0	15.0	13.0
山西	85.0	12.0	10.0
内蒙古	196.3	12.0	13.0
辽宁	140.0	14.0	12.0
吉林	137.3	16.0	13.0
黑龙江	363.3	12.0	13.0
陕西	107.0	12.0	10.0
甘肃	120.9	13.0	10.0
青海	29.6	10.0	10.0
宁夏	72.8	15.0	10.0
新疆	563.0	20.0	12.0

水利部办公厅印发《2023 年水利系统节约用水工作要点》指出,持续实施国家节水行动,进一步强化用水总量强度双控。强化万元地区生产总值用水量、万元工业增加值用水量、农田灌溉水有效利用系数等关键用水指标管控,推动各地完成年度控制目标。持续推进黄河流域深度节水控水,探索推行黄河流域强制性用水定额管理^[13]。

2021 年中国工业和信息化部等六部门联合印发《工业废水循环利用实施方案》,提出到 2025 年,力争规模以上工业用水重复利用率达到 94% 左右,钢铁、石化化工、有色等行业规模以上工业用水重复利用率进一步提升,纺织、造纸、食品等行业规模以上工业用水重复利用率较 2020 年提升 5 个百分点以上,工业用市政再生水量大幅提高,万元工业增加值用水量较 2020 年下降 16%,基本形成主要用水行业废水高效循环利用新格局^[14]。氢能作为新兴产业尚未纳入政策中,将来采取重复使用水资源和提升电解水设备效率时,可有效降低水资源消耗量,不断接近理论耗水,但也将增加相关设备额外投资。

2.2 规模制取绿氢大量消耗水资源

现有可再生能源制氢技术条件下,绿氢制取过程除了大规模消耗电力以外,还将大量消耗水资源,理论上9 kg水可以制取1 kg氢气,但是所用水是去离子水,使用市政水时,需要经过常规的去离子水生产工艺处理,该工艺整体制水效率为50%~70%,制取1 kg氢气实际耗水量约为20 kg,且为了延长水纯化设备寿命,多采取将过滤后的废水处理达标后排放。对欧洲项目测算^[15]以及国内相关用氢项目调研结果也支持这一耗水量,每公斤氢气对应20 kg耗水量是现阶段比较保守的数字。年产万吨以上的绿氢项目,仅制氢环节耗水量就达20万t以上,对于水资源匮乏地区,在中国严格的用水制度下,水资源将是影响制氢规模和制氢项目运行的重要因素。在地区用水总量不变的情况下,布局绿氢项目势必会对其他产业用水造成挤压,一定程度上将加剧水资源紧缺情况或提升水资源价格。

2020年欧洲100 MW的电解水制氢成本中,电力成本占比56%,资本成本占38%,电解槽运营成本占5%,水成本占1%。由于水的成本占比较小,绿氢项目建设中忽略了水在资源角度带来的限制。随着电解水系统成本下降以及可再生能源电力价格下降,绿氢整体成本会随之降低,然而水的资源稀缺性将会体现,其成本占比将会大幅上升,且随着资源的日益紧缺,水成本占比还将进一步扩大。IEA发布的部分研究成果也提示了水资源对氢气制取的影响问题,水资源匮乏地区需要仔细评估制氢项目的建设,水资源应该作为评估能源项目,包括制氢项目在内的物理、经济和环境可行性的衡量指标,氢能产业的发展不应忽略对水资源的管理^[16]。

以内蒙古自治区2021年以来连续公布的31个可再生能源制氢项目^[17]为例,全部投产后累计制氢能力达到53.189万t/a,不考虑循环用水情况下,对应水资源需求约为1.064亿m³,约占内蒙古用水总量的0.54%。大规模制氢项目投产必将对内蒙古自治区内既有工业、农业等用水产生竞争,届时,为保持正常生产生活,内蒙古水资源供给量将难以维持现有平衡。

2.3 绿氢带动化工产业用水增加

现阶段,“电-氢-电”总体效率不足35%,实际运

行中会出现低于30%的情况,马上开展大规模绿氢制取并用作发电上网,显然不符合我国可再生能源发展目标,并且有违国家鼓励的能源高效利用和可持续发展战略。所以,目前我国绿氢的规模应用领域只有工业,从全球氢消纳路径看,工业领域以炼化、合成氨、合成甲醇以及钢铁冶炼为主^[7],我国也以炼化、合成氨和合成甲醇为主。

绿氢带动化工领域用水增加主要体现在2个方面。一方面,绿氢成为传统化工领域停产企业复产和生产企业改造、扩产的重要依托,特别是扩产部分在总量上增加了化工品产出,如国内公布绿氢项目多为合成氨、合成甲醇新增或扩产项目^[18],使得化工总体用水量增加。

另一方面,绿氢的替代在现阶段并未起到明显的节水作用。首先,现有技术条件下,可再生能源制氢化工一体化项目在化工环节多保留传统化石能源制氢工艺,以保证长周期生产稳定,因为无电网电力支撑的制氢系统会由于风光发电出力的不稳定致使大规模可再生能源制氢项目难以稳定供给氢气,这与化工系统对稳定运行的需求匹配不佳,即使布局一定规模储电或储氢以满足短时间供给稳定,但从化工项目长周期稳定运行角度看,此类氢源并不能100%满足化工项目的实际需求;例如,有电网支撑的中国石化新疆库车绿氢示范项目能够实现绿氢完全替代天然气制氢,无电网支撑的宝丰能源太阳能电解水制氢项目则采取绿氢部分替代、煤制氢为主的方案实现稳定生产。其次,先进化石能源制氢技术耗水已较低,绿氢替代化石能源制氢实际节水效果有限。如焦炉煤气副产氢每公斤氢气约需水56 kg^[19-20],煤气化过程每公斤氢气约需水30 kg^[21-22],现有甲烷蒸汽重整制氢工艺下,包含冷却用水在内,天然气制取1 kg氢气的耗水量为6.4~32.2 kg^[23];同时需考虑氢气是化工生产过程产品,水资源在整个传统化工生产中会被其他产品使用或参与水循环过程;这就使得绿氢对化石能源制氢替代在化工领域并不能有效节水。

此外,我国现代煤化工产业已成为宁夏、内蒙古、山西、陕西等黄河流域地区高耗水产业,绿氢项目与化工产业集聚地点重合,势必加剧地区用水紧张程度^[24]。

3 水资源影响下中国绿氢发展趋势

我国绿氢产业发展中,行业集中关注了电价水平对产业发展的影响,忽略了水资源客观上不均衡分布对绿氢产业的布局影响;考虑我国水资源分布,未来我国绿氢发展有望呈现 3 个发展趋势。

3.1 绿氢产业聚焦全局战略

绿氢虽然具有众多应用场景,并被全球寄予了碳减排的厚望,但是,绿氢在中国各地区不具有相同的生产和使用条件。中国的地形比较多样,生态保护区众多,东部临海,西部沙漠,西南是青藏高原;从水资源丰富程度看,整个中国的南方地区水资源较为丰富,北方地区水资源较为匮乏。我国作为积极倡导环保的国家,环保要求严格,特别是北方主要河流——黄河流域,得到了国家专门政策和法律的特别保护^[25-26],在这些区域用水有着较为严格的限制。此外,极端天气对中国南方的影响也对水资源的开发利用发出了警告,南方也会出现少雨干旱甚至河流干涸的危机。

所以,水资源在工业领域利用时,特别是制氢这种对水消耗比较大的工业生产活动,需要统筹考虑,充分协调各地水资源情况。

3.2 绿氢替代是逐步过渡的过程

绿氢发展将伴随着传统化工产业的有序减产及退出。在水资源一定条件下,新增产业与既有产业之间用水属于零和博弈,处于此消彼长的状态,只有在传统化工产业因碳减排压力而逐步退出市场并空出水资源配额后,绿氢产业才有机会逐步实现规模化。但是,从国内产业结构看,化工产业,特别是煤化工,不仅是“三北”地区重要的经济支撑产业,还以煤炭为核心形成了较长的下游产业链,如煤制氢的同时可以生成以碳为基础的化工产品,这些产品已深入生活的各个方面,故煤化工产业本身将长期存在,绿氢替代虽可实现显著降碳,但也将改变煤炭的使用,进而会影响煤化工下游产业链。

因此,中国氢能产业的发展,将是伴随碳减排对产业倒逼作用出现的逐步发展;短时间内,大规模发展绿氢产业必将出现由于政策和自然条件约束带来的水资源供给限制,进而出现产业发展不协调的问题。

3.3 海水制氢将加速发展

海水将是绿氢制取的重要依托资源。海上风电、

海上光伏产业在中国正在大力发展,海水作为近乎取之不尽的水资源有着巨大的开发空间,结合海上风电、海上光伏以及其他海洋能,能够很好地发挥海洋的资源优势^[27]。同时,海水制氢也将进一步满足沿海地区规模化、低成本的绿氢使用需求。

依托海上发电平台开展海水纯化后制氢、海水原位制氢^[28]、混合海水电解制氢^[29]、海水光解制氢都将是具有很大资源优势的制氢方向,对于开发深远海资源也具有重要意义。

4 结论

我国绿氢产业发展聚焦于降低制氢电耗,进而实现低成本制氢,提升绿氢对化石能源制氢的竞争力,但是忽略了既有政策框架、技术水平、产业布局和既有资源特性的问题。现阶段水资源在绿氢成本占比中不高,但其使用的约束条件,将成为可持续发展背景下影响绿氢产业发展的关键因素。为此,布局绿氢项目时,应充分考虑现状和未来趋势,从全局谋划、产业协调发展、资源有效利用等角度考量,解决水资源对绿氢产业的限制问题。

参考文献:

- [1] 余蕊,贾雯静,王越千.瞭望|擘画氢能发展蓝图——专访中国科学院院士欧阳明高 [EB/OL]. (2022-03-28) [2024-06-12]. http://www.news.cn/2022-03/28/c_1128510369.htm.
YU R, JIA W J, WANG Y Q. Looking out: drawing a blueprint for hydrogen energy development: interview with Ouyang Minggao, Academician of Chinese Academy of Sciences [EB/OL]. (2022-03-28) [2024-06-12]. http://www.news.cn/2022-03/28/c_1128510369.htm
- [2] 潘洁,安蓓.推进氢能产业高质量发展——聚焦《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》 [EB/OL]. (2022-03-23) [2024-06-12]. http://www.news.cn/2022-03/23/c_1128497554.htm.
PAN J, AN B. Promoting the high quality development of hydrogen energy industry: focus on the medium and long-term plan for the development of hydrogen energy industry (2021-2035) [EB/OL]. (2022-03-23) [2024-06-12]. http://www.news.cn/2022-03/23/c_1128497554.htm.
- [3] 联合国新闻.中国国家主席习近平联大致辞:中国积极投身国际抗疫合作争取 2060 年前实现碳中和 [EB/OL]. (2020-09-22) [2024-04-21]. <https://news.un.org/zh/story/2020/09/1067222>.
UN News. Chinese President Xi Jinping's UNGA speech: China actively participates in international cooperation to combat epidemics, strives to achieve carbon neutrality by 2060 [EB/OL]. (2020-09-22) [2024-04-21]. <https://news.un.org/zh/story/2020/09/1067222>.

- [4] 毛宗强,毛志明,余皓,等.制氢工艺与技术[M].北京:化学工业出版社,2018.
MAO Z Q, MAO Z M, YU H, et al. Hydrogen production process in technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2018.
- [5] 中国产学研合作促进会.低碳氢、清洁氢与可再生氢的标准与评价:T/CAB 0078—2020[S].北京:全国团体标准信息平台,2020.
China Association for the Promotion of Industry-University-Research Cooperation. Standard and evaluation of low-carbon hydrogen, clean hydrogen and renewable hydrogen: T/CAB 0078—2020 [S]. Beijing: National Group Standard Information Platform, 2020.
- [6] 科技部高新技术发展及产业化司.关于“十一五”国家高技术研究发展计划(863计划)先进能源技术领域2006年度专题课题评审初步结果的公告[EB/OL].(2006-11-24)[2023-04-23].
https://www.most.gov.cn/tztg/200611/t20061124_38287.html.
Department of High Tech Development and Industrialization of the Ministry of Science and Technology. Announcement on the preliminary results of the review of the 2006 thematic topics in the field of advanced energy technology of the "Eleventh Five-Year Plan" National High Technology Research and Development Program (863 Program) [EB/OL]. (2006-11-24) [2023-04-23]. https://www.most.gov.cn/tztg/200611/t20061124_38287.html.
- [7] 张灿,张明震,申升,等.中国氢能高质量发展的路径建议与政策探讨[J].南方能源建设,2022,9(4):11-23. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.002.
ZHANG C, ZHANG M Z, SHEN S, et al. Path suggestion and policy discussion for China's high-quality development of hydrogen energy [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(4): 11-23. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.002.
- [8] LESTER R, DOWNIE D, GUNASEKERA D, et al. For Australia to lead the way on green hydrogen, first we must find enough water [EB/OL]. (2022-12-22) [2023-04-25]. <https://www.pv-magazine-australia.com/2022/12/22/for-australia-to-lead-the-way-on-green-hydrogen-first-we-must-find-enough-water/>.
- [9] IEA. Global hydrogen review 2022 [R/OL]. (2022-09) [2023-04-25]. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>.
- [10] 中国新闻网.高温致重庆66条河流断流25座水库干涸30万人因旱需生活救助[EB/OL].(2022-08-17)[2023-04-25].
<http://www.chinanews.com.cn/gn/2022/08-17/9830050.shtml>.
China News Network. High temperatures cause 66 rivers to break in Chongqing, 25 reservoirs dry up, 300000 people need livelihood assistance due to drought [EB/OL]. (2022-08-17) [2023-04-25]. <http://www.chinanews.com.cn/gn/2022/08-17/9830050.shtml>
- [11] 马睿,李云玲,何君,等.我国水资源承载力分析及分区管控对策[J].南水北调与水利科技(中英文),2023,21(2):209-217. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0022.
MA R, LI Y L, HE J, et al. Water resources carrying capacity analysis and zoning management measures in China [J]. *South-to-North water transfers and water science & technology*, 2023, 21(2): 209-217. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0022.
- [12] 水利部,国家发展改革委.水利部国家发展改革委关于印发“十四五”用水总量和强度双控目标的通知[EB/OL].(2022-03-11)[2023-04-26].
http://www.mwr.gov.cn/zwgk/gknr/202203/t20220317_1565122.html.
Ministry of Water Resources, National Development and Reform Commission. Ministry of Water Resources National Development and Reform Commission on the issuance of the "14th Five-Year Plan" dual control targets for total water consumption and intensity [EB/OL]. (2022-03-11) [2023-04-26]. http://www.mwr.gov.cn/zwgk/gknr/202203/t20220317_1565122.html.
- [13] 水利部办公厅.水利部办公厅关于印发2023年水利系统节约用水工作要点的通知[EB/OL].(2023-03-02)[2023-04-26].
http://www.mwr.gov.cn/zw/tzgg/tzgs/202303/t20230302_1647713.html.
General Office of the Ministry of Water Resources. Notice of the General Office of the Ministry of Water Resources on the issuance of the main points of water conservation work in the water conservancy system in 2023 [EB/OL]. (2023-03-02) [2023-04-26]. http://www.mwr.gov.cn/zw/tzgg/tzgs/202303/t20230302_1647713.html.
- [14] 人民网.工信部等六部门:到2025年万元工业增加值用水量较2020年下降16%[EB/OL].(2021-12-29)[2023-04-26].
<http://finance.people.com.cn/n1/2021/1229/c1004-32320022.html>.
People's Daily Online. Ministry of Industry and Information Technology and other six departments: by 2025, water consumption of 10000 Yuan of industrial value added will drop by 16% compared to 2020 [EB/OL]. (2021-12-29) [2023-04-26]. <http://finance.people.com.cn/n1/2021/1229/c1004-32320022.html>.
- [15] 合米咨询.绿氢成本深度解析[R/OL].(2022-12-12)[2023-04-27].
<https://www.sgpjbg.com/baogao/109213.html>.
Hemi Consulting. In-depth analysis of green hydrogen cost [R/OL]. (2022-12-12) [2023-04-27]. <https://www.sgpjbg.com/baogao/109213.html>.
- [16] DE OLIVEIRA BREDARIOL T. Clean energy can help to ease the water crisis [EB/OL]. (2023-03-22) [2023-04-27]. <https://www.iea.org/commentaries/clean-energy-can-help-to-ease-the-water-crisis>.
- [17] 内蒙古太阳能行业协会.内蒙古累计批复四批31个风光制氢项目,配置新能源1315.25万千瓦[EB/OL].(2023-02-14)[2023-04-27].
<https://mp.weixin.qq.com/s/0rkuTFjeYXkgxDKvBWI2kQ>.
Inner Mongolia Solar Energy Industry Association. Inner Mongolia approved four batches of 31 scenic hydrogen production projects, allocating 13152500kilowatts of new energy [EB/OL]. (2023-02-14) [2023-04-27]. <https://mp.weixin.qq.com/s/0rkuTFjeYXkgxDKvBWI2kQ>.
- [18] 内蒙古自治区能源局.内蒙古自治区能源局关于实施兴安盟京能煤化工可再生能源绿氢替代示范项目等风光制氢一体化示范项目的通知[EB/OL].(2023-01-04)[2023-04-27].
<https://www.mnr.gov.cn/>

- nyj.nmg.gov.cn/zwgk/zfxgkzl/fdzdgnr/tzgg_16482/tz_16483/202301/t20230104_2197474.html.
Energy Bureau of Inner Mongolia Autonomous Region. Inner Mongolia Autonomous Region Energy Bureau on the implementation of the Xing'an Meng coal chemical renewable energy green hydrogen replacement demonstration project and other scenic hydrogen production integration demonstration projects [EB/OL]. (2023-01-04) [2023-04-27]. https://nyj.nmg.gov.cn/zwgk/zfxgkzl/fdzdgnr/tzgg_16482/tz_16483/202301/t20230104_2197474.html.
- [19] 中国炼焦行业协会. 加快节能降碳改造升级 推动焦化行业绿色低碳高质量发展 [EB/OL]. (2022-03-23) [2023-04-28]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztzl/ghnhjnjdgzsj/zjgd/202203/t20220323_1320107.html.
China Coking Industry Association. Accelerating energy-saving and carbon-reducing transformation and upgrading to promote green and low-carbon high-quality development of coking industry [EB/OL]. (2022-03-23) [2023-04-28]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztzl/ghnhjnjdgzsj/zjgd/202203/t20220323_1320107.html.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 取水定额 第 30 部分: 炼焦: GB/T 18916.30—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Norm of water intake: part 30: coking: GB/T 18916.30—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [21] 张军. 现代煤化工水系统特性分析及优化研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
ZHANG J. Characteristic analysis and optimization research on water system in modern coal chemical industry [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [22] 王金华. 煤化工行业高水耗问题分析与改进措施 [J]. 化工管理, 2020(34): 102-103. DOI: 10.3969/j.issn.1008-4800.2020.34.049.
WANG J H. Analysis and improvement measures of high water consumption in coal chemical industry [J]. *Chemical enterprise management*, 2020(34) : 102-103. DOI: 10.3969/j.issn.1008-4800.2020.34.049.
- [23] BLANCO H. Hydrogen production in 2050: how much water will 74EJ need? [EB/OL]. (2021-07-22) [2023-04-28]. <https://energypost.eu/hydrogen-production-in-2050-how-much-water-will-74ej-need/>.
- [24] 霍婧, 赵卫东. 对黄河流域现代煤化工产业绿色低碳发展的建议 [J]. 科技中国, 2021(8): 22-24.
HUO J, ZHAO W D. Suggestions for the green and low-carbon development of modern coal chemical industry in the Yellow River Basin [J]. *China scitechnology think tank*, 2021(8): 22-24.
- [25] 生态环境部, 发展改革委, 自然资源部, 等. 关于印发《黄河流域生态环境保护规划》的通知 [EB/OL]. (2022-06-28) [2023-04-28]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/zcghtjdd/ghxx/202206/t20220628_987021.shtml.
Ministry of Ecology and Environment, Development and Reform Commission, Ministry of Natural Resources, et al. Notice on the issuance of the "Yellow River Basin Ecological Environmental Protection Plan" [EB/OL]. (2022-06-28) [2023-04-28]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/zcghtjdd/ghxx/202206/t20220628_987021.shtml.
- [26] 中国人大网. 中华人民共和国黄河保护法 [EB/OL]. (2022-10-30) [2023-04-25]. http://www.npc.gov.cn/npc/c2/c30834/202210/t20221030_320097.html.
China National People's Congress. Law of the People's Republic of China on the protection of the Yellow River [EB/OL]. (2022-10-30) [2023-04-25]. http://www.npc.gov.cn/npc/c2/c30834/202210/t20221030_320097.html.
- [27] 陈鸿琳, 刘新苗, 余浩, 等. 基于近似动态规划的海上风电制氢微网实时能量管理策略 [J]. 电力建设, 2022, 43(12): 94-102. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2022.12.010.
CHEN H L, LIU X M, YU H, et al. Real-time energy management strategy based on approximate dynamic programming for offshore wind power-to-hydrogen microgrid [J]. *Electric power construction*, 2022, 43(12) : 94-102. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2022.12.010.
- [28] XIE H P, ZHAO Z Y, LIU T, et al. A membrane-based seawater electrolyser for hydrogen generation [J]. *Nature*, 2022, 612(7941): 673-678. DOI: 10.1038/s41586-022-05379-5.
- [29] SUN F, QIN J S, WANG Z Y, et al. Energy-saving hydrogen production by chlorine-free hybrid seawater splitting coupling hydrazine degradation [J]. *Nature communications*, 2021, 12(1): 4182. DOI: 10.1038/s41467-021-24529-3.

作者简介:



张明震

张明震 (第一作者, 通信作者)

1991-, 男, 满族, 研发工程师, 主要从事氢能及新型储能产业技术研究、工业经济研究工作(e-mail)zhangmingzhen@powerchina.cn。

张灿

1986-, 男, 管理科学与工程博士, 工程师, 主要研究方向为能源经济与管理(e-mail)mr.zhangcan@ucass.edu.cn。

吴秀山

1989-, 男, 高级工程师, 浙江大学水文学及水资源硕士, 主要从事新能源规划工作(e-mail)wuxiushan@powerchina.cn。

程前

1994-, 男, 硕士, 主要从事新能源产业技术研究工作(e-mail)chengqian@powerchina.cn。

(编辑 叶筠英)