



环境科学  
Environmental Science  
ISSN 0250-3301, CN 11-1895/X

## 《环境科学》网络首发论文

题目：典型氢能产品生命周期评价和碳足迹比较  
作者：黄小娱，谢明辉，李晓蔚，江乐勇  
DOI：10.13227/j.hjcx.202311004  
收稿日期：2023-11-01  
网络首发日期：2024-02-21  
引用格式：黄小娱，谢明辉，李晓蔚，江乐勇. 典型氢能产品生命周期评价和碳足迹比较[J/OL]. 环境科学. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202311004>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 典型氢能产品生命周期评价和碳足迹比较

黄小娱<sup>1</sup>, 谢明辉<sup>1\*</sup>, 李晓蔚<sup>1</sup>, 江乐勇<sup>2</sup>

(1.中国环境科学研究院, 北京 100012; 2.信开环境投资有限公司, 北京 101100)

**摘要:** 为对比灰氢、蓝氢和绿氢产生的环境影响及碳足迹, 通过文献调研获取数据清单, 部分国内没有的数据清单通过国外清单结合本地化电力转换获取, 选用本地化终点破坏型生命周期影响评价方法, 计算 5 种氢能产品的原料获取、运输和制氢阶段的环境影响潜值, 计算碳足迹, 进行敏感性分析和不确定性分析, 并与 ReCiPe 方法对比. 结果表明: ①环境影响方面, 各氢能产品环境影响潜值由大到小排序为: 灰氢(煤) (1203 mPt kg<sup>-1</sup>) > 蓝氢(煤) (876 mPt kg<sup>-1</sup>) > 灰氢(气) (492 mPt kg<sup>-1</sup>) > 绿氢 (323 mPt kg<sup>-1</sup>) > 蓝氢(气) (252 mPt kg<sup>-1</sup>); 灰氢和蓝氢的环境影响主要集中在气候变化、细颗粒物形成和化石燃料方面, 绿氢的环境影响主要集中在气候变化、细颗粒物形成、化石燃料和矿产资源方面. ②碳足迹方面, 由大到小排序为: 灰氢(煤) (23.79 kg kg<sup>-1</sup>, 以 CO<sub>2</sub>eq 计, 下同) > 蓝氢(煤) (11.07 kg kg<sup>-1</sup>) > 灰氢(气) (10.97 kg kg<sup>-1</sup>) > 蓝氢(气) (3.47 kg kg<sup>-1</sup>) > 绿氢 (1.97 kg kg<sup>-1</sup>). 灰氢、蓝氢生产过程中的直接碳排放均占比最大, 绿氢则为电力输入所占比重大. ③降低环境影响和碳排放的措施包括减少污染物和温室气体直接排放、降低电耗、加强原料替代和减量.

**关键词:** 氢; 生命周期评价; 环境影响; 碳足迹; 敏感性分析

DOI:10.13227/j.hjx.202311004

收稿日期: 2023-11-01; 修订日期: 2024-01-11

基金项目: 国家社科基金重大项目(22ZDA106)

作者简介: 黄小娱 (1999~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生命周期评价, E-mail: huangxiaoyu22@mails.ucas.ac.cn

\*通信作者, E-mail: xiemh@craes.org.cn

## Comparative Life Cycle Assessment and Carbon Footprint of Typical Hydrogen Energy Products

HUANG Xiao-yu<sup>1</sup>, XIE Ming-hui<sup>1\*</sup>, LI Xiao-wei<sup>1</sup>, JIANG Le-yong<sup>2</sup>

(1.Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Xinkai Environment Investment Co., Ltd., Beijing 101100, China)

**Abstract:** In order to compare the environmental impact and carbon footprint of gray hydrogen, blue hydrogen and green hydrogen, the inventories were obtained through literature research. Some inventories that are not available in China are obtained through foreign inventories combined with localized power conversion. The localized end-point

destructive life cycle impact assessment method was used to calculate the environmental impact potential of the raw material acquisition, transportation and hydrogen production stages of five hydrogen products. The carbon footprint was calculated, the sensitivity analysis and uncertainty analysis were carried out, and compared with the ReCiPe method. The results show that: ① Environmental impact, from large to small : grey hydrogen ( coal ) ( 1203 mPt kg<sup>-1</sup> ) > blue hydrogen ( coal ) ( 876 mPt kg<sup>-1</sup> ) > grey hydrogen ( gas ) ( 492 mPt kg<sup>-1</sup> ) > green hydrogen ( 323 mPt kg<sup>-1</sup> ) > blue hydrogen ( gas ) ( 252 mPt kg<sup>-1</sup> ) ; the environmental impacts of gray hydrogen and blue hydrogen are mainly concentrated in climate change, fine particulate matter formation, and fossil fuels. The environmental impacts of green hydrogen are mainly concentrated in climate change, fine particulate matter formation, fossil fuels, and mineral resources. ② Carbon footprint, from large to small is: grey hydrogen ( coal ) ( 23.79 kg kg<sup>-1</sup> , measured by CO<sub>2</sub>eq, the same below ) > blue hydrogen ( coal ) ( 11.07 kg kg<sup>-1</sup> ) > grey hydrogen ( gas ) ( 10.97 kg kg<sup>-1</sup> ) > blue hydrogen ( gas ) ( 3.47 kg kg<sup>-1</sup> ) > green hydrogen ( 1.97 kg kg<sup>-1</sup> ). Direct carbon emissions in the production process of gray hydrogen and blue hydrogen account for the largest proportion, while green hydrogen accounts for a large proportion of power input. ③ Measures to reduce environmental impact and carbon emissions include reducing direct emissions of pollutants and greenhouse gases, reducing power consumption, and strengthening raw material substitution and reduction.

**Key words:** hydrogen; life cycle assessment; environmental impact; carbon footprint; sensitivity analysis

为应对能源短缺、气候变化和环境污染等问题，开发利用清洁能源已成为全球各国的共识。氢能具有能量密度高、制取和使用过程清洁、使用场景及获取方式多样等优点，逐渐成为关注的重点<sup>[1]</sup>。早在 2006 年，国务院发布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020 年）》就指出要将可再生能源制氢、氢能储运等技术作为研究重点；国家“十四五”规划纲要中把氢能与储能列为前瞻谋划的六大未来产业之一<sup>[2]</sup>。由此可见，氢能越来越受到关注，特别是在当前碳达峰、碳中和目标下，发展氢能意义重大。

我国氢能市场巨大，据估算<sup>[3]</sup>，到 2060 年，我国氢能需求量将由目前的 3000 多万 t 升至约 1.3 亿 t，提升 3 倍以上，氢能将在交通运输、建筑和储能等方面进行广泛使用。目前制氢方式分为灰氢、蓝氢和绿氢这 3 种技术路径，灰氢是指以化石能源和工业副产为原料制成的氢气，制备过程中往往会产生大量二氧化碳；蓝氢指在灰氢的基础上增加碳捕获和封存（carbon capture and storage，CCS）技术来减少二氧化碳排放制氢；绿氢指通过可再生能源（如光伏和风电）电解制氢。

国外对于各种制氢方式的环境影响研究较早，如早在 2002 年，Maximiliano 等<sup>[4]</sup>对碳氢化合物原料（甲烷、石脑油）和植物油（菜籽油、大豆油、棕榈油）的重整制氢进行了生命周期清单分析，结果表明，天然气和石脑油在 100 年时间框架内与蒸汽重整制氢相关的全球变暖潜能值（global warming potential，GWP，以 CO<sub>2</sub>eq 计）分别为 9.71 kg kg<sup>-1</sup> 和 9.46

kg kg<sup>-1</sup>. Spath 等<sup>[5]</sup>、Suleman 等<sup>[6]</sup>和 Amran 等<sup>[7]</sup>对天然气制氢的整体环境影响和温室气体排放量等进行了研究. Cetinkaya 等<sup>[8]</sup>、Ruether 等<sup>[9]</sup>和 Kumar 等<sup>[10]</sup>分析了煤气化制氢技术的环境影响. 随着新能源技术的不断进步, 2011 年, Lombardi 等<sup>[11]</sup>对采用光伏发电电解制氢技术进行了环境影响评估, 发现绿氢可以大幅降低环境影响和碳排放; 此外, 也有学者对使用其他可再生能源 (如风力发电<sup>[12,13]</sup>、核电<sup>[14]</sup>、生物质能<sup>[15]</sup>) 制氢的环境影响进行了比较和研究. 国内对制氢技术生命周期评价的研究晚于国外. 在评价对象方面, 李奕阳<sup>[16]</sup>对煤气化制氢、电解制氢、天然气重整制氢以及生物质气化制氢四种制氢技术进行了比较研究; 孔德洋等<sup>[17]</sup>针对风力发电、光伏发电以及我国目前电力结构下发电电解水制氢技术的环境影响进行了分析; Liu 等<sup>[18]</sup>比较了两种煤制氢技术的生命周期能耗和温室气体排放; 赵佳康<sup>[19]</sup>比较了碱性电解水和质子交换膜电解水两种电解水制氢方式的环境影响. 另外国内有关氢能生命周期评价的研究多与氢燃料汽车有关<sup>[20~26]</sup>, 这主要是由于氢能的终端使用之一便是氢燃料汽车, 而新能源汽车已成未来汽车的发展方向. 目前国内制氢技术的环境影响评估及生命周期评价的相关研究还不多, 且完全采用本地化数据清单和评价模型的研究较少. 因此, 本文采用生命周期评价方法, 通过本地化的数据收集和模型解析, 对灰氢、蓝氢和绿氢的环境影响及碳足迹进行量化比较, 并识别出影响较大的因素, 以期科学规范地制定氢能发展的环境管理政策提供支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 系统边界和功能单位

本文选用 1 kg 的气态氢能产品为功能单位, 对灰氢 (煤)、灰氢 (气)、蓝氢 (煤)、蓝氢 (气) 和绿氢这 5 种制氢技术进行生命周期评价.

灰氢 (煤) 是指以煤炭为原料, 采用煤气化技术制氢. 即在高温下将碳转化为一氧化碳和氢气为主的合成气, 再经过净化、一氧化碳转化、提纯等环节, 获得一定纯度的氢能产品. 根据生产过程, 灰氢 (煤) 的系统边界涵盖 3 个过程: 煤炭获取、煤炭运输和煤气化. 灰氢 (煤) 的主要优势在于其生产成本较低且技术相对成熟, 但其局限性在于其产生大量二氧化碳排放, 对环境的影响较大. 蓝氢 (煤) 是在灰氢 (煤) 的基础上增加 CCS 工艺, 这使得其在碳减排方面的表现略有改善. 然而, 仍需考虑 CCS 工艺的成本和实施技术成熟度等问题. 蓝氢 (煤) 的系统边界涵盖 4 个过程: 煤炭获取、煤炭运输、煤气化和 CCS.

灰氢 (气) 是指以天然气为原料, 采用天然气水蒸汽重整技术制氢. 即将预处理后的天然气与水蒸汽高温重整制合成气, 在中温下进一步变换成氢气与二氧化碳, 再经冷凝、变压吸附最终得到氢气. 系统边界根据生产工艺涵盖 3 个过程: 天然气获取、天然气运输、天然气水蒸汽重整. 灰氢 (气) 的主要优势在于现有的天然气基础设施能够支持其生产, 并且

生产过程较为成熟，成本相对较低，但生产过程中仍会产生二氧化碳排放。蓝氢（气）是在灰氢（气）的基础上增加 CCS 工艺，这使得其在碳减排方面的表现相对改善，但实施 CCS 工艺需要投入大量资金和技术支持。蓝氢（气）系统边界涵盖 4 个过程：天然气获取、天然气运输、天然气水蒸汽重整和 CCS。

绿氢是指以水为原料，采用可再生能源（本文选取光伏发电）电解制氢。绿氢生产过程中零碳排放，可达到零排放的环保效果，另外，利用光伏发电等可再生能源进行电解水制氢，不依赖于有限的化石燃料，有助于能源结构的转型和可持续发展，但其局限性可能在于生产过程的能源需求和成本较高，使用光伏发电等可再生能源成本较高，同时电解装置等设备也相对昂贵，导致其生产成本较高。本文选取当前已商业化运行的碱性电解水制氢技术，即以碱性溶液为电解质，石棉布等材料为隔膜，铂和镍等为电极，采用光伏发电，将水电解成氢气和氧气。根据生产流程，系统边界包括 3 个部分：光伏发电、电解装置和其他构件。

5 种氢能产品的系统边界均不包括氢气的运输及下游应用阶段，系统边界示意如图 1 所示。

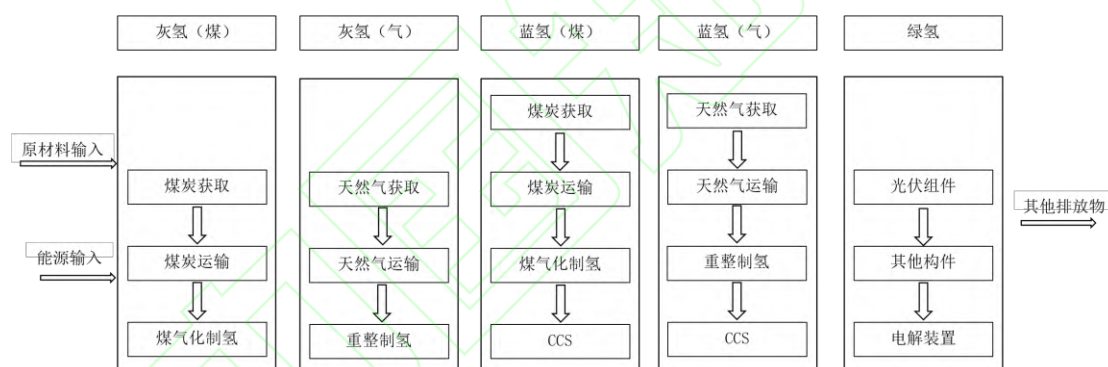


图 1 各氢能产品系统边界示意

Fig. 1 Schematic diagram of the system boundary for each hydrogen product

## 1.2 清单分析

生产 1 kg 氢能产品所消耗的资源、能源为前景数据，主要通过文献调研、物料衡算和经验假设获取。资源和能源的单位消耗量生命周期数据清单为背景数据，获取方式先以国内数据查找为主，部分国内没有的清单数据通过 Ecoinvent 数据库获取，并进行本地化电力转换。不同国家或地区的电力生产方式、能源来源和技术水平不同，因此将背景数据中的电力数据转换成国内电力清单，更能反映我国实际情况，更加准确和可靠。具体转换方式为在 Ecoinvent 数据库中新建我国电力清单<sup>[3-7]</sup>，将某类资源和能源的背景数据中的电力清单替换成新建的我国电力清单，如将 Ecoinvent 数据库中石灰石背景数据的电耗换成我国的电力



清单，则完成了石灰石背景数据的本地化转换. 5 种氢能产品的清单数据及背景数据来源如表 1 所示.

灰氢（煤）和蓝氢（煤）的前景数据主要来自 Li 等<sup>[27]</sup>的研究，煤炭获取阶段的背景数据为国内数据，煤炭运输阶段的环境影响主要由运输工具的燃料使用产生，由于缺乏详细的运输方式、运输消耗等数据，本文采用 2017 年中国煤炭运输的平均数据来代表煤制氢工厂上游供应链的煤炭运输水平. 假设煤炭铁路运输的能耗只由电力引起，水路和公路所用燃油均为柴油，煤炭的运输方式和能耗强度见表 2，由此计算出制成 1kg 氢能产品所需煤炭运输所需的电力及柴油消耗量. 灰氢（气）和蓝氢（气）的前景数据主要来自 Cetinkaya 等<sup>[8]</sup>和 Al-Qahtani 等<sup>[28]</sup>的研究，天然气获取阶段的数据清单来自于丁宁等<sup>[29]</sup>建立的我国化石能源的生命周期清单模型. 天然气自身性质而存在的特性决定了其最合适通过管道进行运输<sup>[30]</sup>，天然气输送到城市门站或大型工业用户，其间经历加热、计量和分流等过程，而且输送距离越长，需要消耗的燃料动力越多<sup>[31]</sup>，天然气运输阶段数据清单仅考虑消耗的能源，不考虑运输阶段基础设施建设所需耗材，数据清单来自于蒋慧<sup>[32]</sup>的研究. 绿氢的前景数据主要来自赵佳康<sup>[19]</sup>的研究，本研究选用的可再生能源为光伏发电，清单数据来自武琛昊等<sup>[33]</sup>的相关研究. 将前景数据与背景数据加乘，再加上生产过程的污染物排放数据，即可得到生产 1 kg 的 5 种氢能产品生命周期数据清单.

表 1 氢能产品的清单数据及背景数据来源

| 氢能产品  | 资源能源消耗类型 | 前景数据 |                       | 文献 <sup>1)</sup>           |
|-------|----------|------|-----------------------|----------------------------|
|       |          | 数值   | 单位                    |                            |
| 灰氢（煤） | 煤炭获取     | 煤    | $8.90 \times 10^0$    | kg kg <sup>-1</sup> [29]   |
|       |          | 柴油   | $8.90 \times 10^{-2}$ | kg kg <sup>-1</sup> /      |
|       |          | 电力   | $3.50 \times 10^{-1}$ | kW h kg <sup>-1</sup> [37] |
|       | 煤炭运输     | 电力   | $5.79 \times 10^{-2}$ | kW h kg <sup>-1</sup> [37] |
|       |          | 柴油   | $3.88 \times 10^{-2}$ | L kg <sup>-1</sup> /       |
|       |          | 电力   | $4.39 \times 10^0$    | kW h kg <sup>-1</sup> [36] |
|       | 气化制氢     | 石灰石  | $1.61 \times 10^{-1}$ | kg kg <sup>-1</sup> /      |
|       |          | 氧化铝  | $9.80 \times 10^{-1}$ | g kg <sup>-1</sup> [38]    |
|       |          | 甲醇   | $4.44 \times 10^0$    | g kg <sup>-1</sup> [39]    |
| 灰氢（气） | 天然气获取    | 天然气  | $3.36 \times 10^0$    | kg kg <sup>-1</sup> [29]   |
|       | 天然气运输    | 电力   | $5.78 \times 10^{-3}$ | kW h kg <sup>-1</sup> [37] |
|       |          | 燃气   | $7.66 \times 10^{-1}$ | kg kg <sup>-1</sup> /      |
|       |          | 水泥   | $1.26 \times 10^1$    | g kg <sup>-1</sup> [34]    |
|       | 重整制氢     | 钢    | $4.03 \times 10^0$    | g kg <sup>-1</sup> [35]    |
|       |          | 铝    | $3.30 \times 10^{-2}$ | g kg <sup>-1</sup> [36]    |
|       |          | 电力   | $3.10 \times 10^{-1}$ | kW h kg <sup>-1</sup> [37] |

|       |          |                         |                       |                       |      |
|-------|----------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|------|
|       |          | 铁                       | $4.90 \times 10^{-2}$ | $\text{g kg}^{-1}$    | /    |
|       |          | 煤                       | $8.90 \times 10^0$    | $\text{kg kg}^{-1}$   | [29] |
|       | 煤炭获取     | 柴油                      | $8.90 \times 10^{-2}$ | $\text{kg kg}^{-1}$   | /    |
|       |          | 电力                      | $3.50 \times 10^{-1}$ | $\text{kW h kg}^{-1}$ | [37] |
|       | 煤炭运输     | 电力                      | $5.79 \times 10^{-2}$ | $\text{kW h kg}^{-1}$ | [37] |
|       |          | 柴油                      | $3.88 \times 10^{-2}$ | $\text{L kg}^{-1}$    | /    |
| 蓝氢（煤） |          | 电力                      | $7.78 \times 10^0$    | $\text{kW h kg}^{-1}$ | [37] |
|       |          | 石灰石                     | $1.60 \times 10^{-1}$ | $\text{kg kg}^{-1}$   | /    |
|       | 气化制氢+CCS | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $9.80 \times 10^{-1}$ | $\text{g kg}^{-1}$    | [38] |
|       |          | 甲醇                      | $4.44 \times 10^0$    | $\text{g kg}^{-1}$    | [39] |
|       |          | 液氨                      | $5.7 \times 10^{-2}$  | $\text{g kg}^{-1}$    | /    |
|       | 天然气获取    | 天然气                     | $3.78 \times 10^0$    | $\text{kg kg}^{-1}$   | [29] |
|       |          | 电力                      | $6.50 \times 10^{-3}$ | $\text{kW h kg}^{-1}$ | [37] |
|       | 天然气运输    | 燃气                      | $8.62 \times 10^{-1}$ | $\text{kg kg}^{-1}$   | /    |
|       |          | 电力                      | $1.11 \times 10^0$    | $\text{kW h kg}^{-1}$ | [37] |
| 蓝氢（气） |          | 水泥                      | $1.26 \times 10^1$    | $\text{g kg}^{-1}$    | [34] |
|       | 重整制氢+CCS | 钢                       | $4.03 \times 10^0$    | $\text{g kg}^{-1}$    | [35] |
|       |          | 铝                       | $3.30 \times 10^{-2}$ | $\text{g kg}^{-1}$    | [36] |
|       |          | 铁                       | $4.90 \times 10^{-2}$ | $\text{g kg}^{-1}$    | /    |
|       |          | 镍                       | $2.00 \times 10^{-2}$ | $\text{kg kg}^{-1}$   | /    |
|       |          | 铂                       | $1.61 \times 10^{-5}$ | $\text{kg kg}^{-1}$   | /    |
|       | 电解装置     | 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯             | $2.14 \times 10^{-4}$ | $\text{kg kg}^{-1}$   | /    |
|       |          | 石墨                      | $5.76 \times 10^{-4}$ | $\text{kg kg}^{-1}$   | /    |
|       |          | 水                       | $9.40 \times 10^1$    | $\text{kg kg}^{-1}$   | /    |
|       |          | 氢氧化钾                    | $1.50 \times 10^{-2}$ | $\text{kg kg}^{-1}$   | /    |
| 绿氢    |          | 铜                       | $2.68 \times 10^{-3}$ | $\text{kg kg}^{-1}$   | [40] |
|       |          | 润滑油                     | $6.43 \times 10^{-7}$ | $\text{kg kg}^{-1}$   | /    |
|       |          | 聚苯硫                     | $4.02 \times 10^{-4}$ | $\text{kg kg}^{-1}$   | /    |
|       | 其他构件     | 聚四氟乙烯                   | $1.04 \times 10^{-4}$ | $\text{kg kg}^{-1}$   | /    |
|       |          | 钢                       | $2.00 \times 10^{-1}$ | $\text{kg kg}^{-1}$   | [35] |
|       |          | 铝                       | $6.02 \times 10^{-4}$ | $\text{kg kg}^{-1}$   | [36] |
|       |          | 热能                      | $1.19 \times 10^{-1}$ | $\text{MJ kg}^{-1}$   | /    |
|       | 电力输入     | 光伏电力                    | $5.47 \times 10^1$    | $\text{kW h kg}^{-1}$ | [33] |

1) “/”表示背景数据来自 Ecoinvent 数据库，并进行本地化电力转换

表 2 煤炭运输与能耗强度

| 运输方式 | 比例/%  | 能耗类型 | 平均运输距离 <sup>[4 1]</sup> ,<br>4 2 l/km | 能耗强度 <sup>[4 3~4 5]</sup>                   | 总能耗                        |
|------|-------|------|---------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------|
| 铁路   | 70.60 | 电力   | 651                                   | $1 \times 10^{-5} \text{ kW h (t km)}^{-1}$ | $6.51 \text{ kW h t}^{-1}$ |
| 水路   | 19.10 | 柴油   | 1255                                  | $2.15 \times 10^{-3} \text{ L (t km)}^{-1}$ | $2.70 \text{ L t}^{-1}$    |
| 公路   | 10.30 | 柴油   | 179                                   | $9.70 \times 10^{-3} \text{ L (t km)}^{-1}$ | $1.66 \text{ L t}^{-1}$    |

### 1.3 影响评价模型

影响评价方法采用的是李雪迎等<sup>[4 6]</sup>构建的适用于我国的终点损害类生命周期影响评价模型. 此模型以我国为基准区域、以 2017 年为基准年, 对人体健康、生态环境和资源的人均基准值进行了核算, 筛选了 11 个环境影响类别, 对应 3 个终点损害类别, 分别是人体健康 (致癌作用、细颗粒物形成、气候变化、水资源消耗、光化学臭氧形成)、生态系统 (气候变化、水资源消耗、生态毒性、酸化、富营养化、光化学臭氧形成、土地利用) 和资源 (矿产资源、化石燃料). 与 ReCiPe 评价方法对比, 本地化终点损害类评价方法结合了国内外的文献和数据, 通过多种核算方法来确定适合我国的损害因子, 并考虑了不同污染物、资源和能源在特定环境影响类别下的排放量和产量, 以此为基础进行环境影响评估. 在此模型的基础上, 根据氢能产品的清单数据, 选择对应的环境影响类别及其子类型, 如表 3 所示, 并在 Simapro 9.0 软件建模后得出相应的环境影响 (以环境影响潜值计, 单位为 mPt) 及碳足迹 (以 CO<sub>2</sub>eq 计). 原模型中人体健康、生态环境和资源的权重分别为 60%、25%和 15%, 人体健康权重值较高, 本研究稍作调整.

表 3 氢能产品环境影响评价模型及相关参数

| 影响类型 | 子类型     | 单位 <sup>1)</sup> | 人均基准值                 | 权重因子/% |
|------|---------|------------------|-----------------------|--------|
| 人体健康 | 致癌      | DALY             | $1.85 \times 10^{-2}$ | 50     |
|      | 对呼吸系统影响 |                  |                       |        |
|      | 气候变化    |                  |                       |        |
|      | 光化学臭氧形成 |                  |                       |        |
| 生态系统 | 气候变化    | species          | $3.08 \times 10^{-5}$ | 30     |
|      | 光化学臭氧形成 |                  |                       |        |
|      | 酸化      |                  |                       |        |
| 资源   | 矿产资源    | MJ               | $2.47 \times 10^3$    | 20     |
|      | 化石燃料    |                  |                       |        |

1) DALY (disability adjusted life years)为伤残调整寿命年, species 为物种群的潜在减少值

## 2 结果与分析

### 2.1 环境影响

各氢能产品生命周期评价结果如图 2 所示, 蓝氢 (煤)、灰氢 (煤)、蓝氢 (气) 和



灰氢（气）的环境影响主要集中在气候变化、细颗粒物形成和化石燃料方面，这是由于制氢原料为化石燃料（煤与天然气），化石燃料产生的温室气体也较多，另外生产过程中耗电较多，而我国的电力结构又以火力发电为主所导致，发电过程排放的颗粒物较多，对呼吸系统影响较大。绿氢则主要集中在气候变化、细颗粒物形成、化石燃料和矿产资源方面，这是由于电解水制氢耗电大，而光伏发电的重要组件，晶硅制备过程耗电也较大，其中电耗在光伏组件全生命周期环境影响的占比可达 60%以上，因此在气候变化、对呼吸系统影响和化石燃料方面的环境影响潜值较高，电解过程使用镍、铂等金属，因此在矿产资源方面影响也较大。生命周期评价终点结果如图 3 所示，各氢能产品均在人体健康方面的环境影响潜值最高，主要是由于排放的颗粒物对人体健康影响较大。相较于其他氢能产品，由于电解装置和其他构件对镍、铂、铜、铝等金属产品的使用，绿氢在资源方面的环境影响潜值明显高于其他氢能产品。

各氢能产品的环境影响潜值由大到小排序为：灰氢（煤）（1203 mPt，）>蓝氢（煤）（876 mPt）>灰氢（气）（492 mPt）>绿氢（323 mPt）>蓝氢（气）（252 mPt）。蓝氢（煤）的环境影响潜值相较于灰氢（煤）降低 27.18%，蓝氢（气）相较于灰氢（气）降低 48.78%，均有不同程度的下降，这其中 CCS 技术起到了较大的作用。绿氢的环境影响潜值仅略高于蓝氢（气），位居第四，说明在整体的环境影响方面，绿氢亦是较为环境友好的氢能产品。

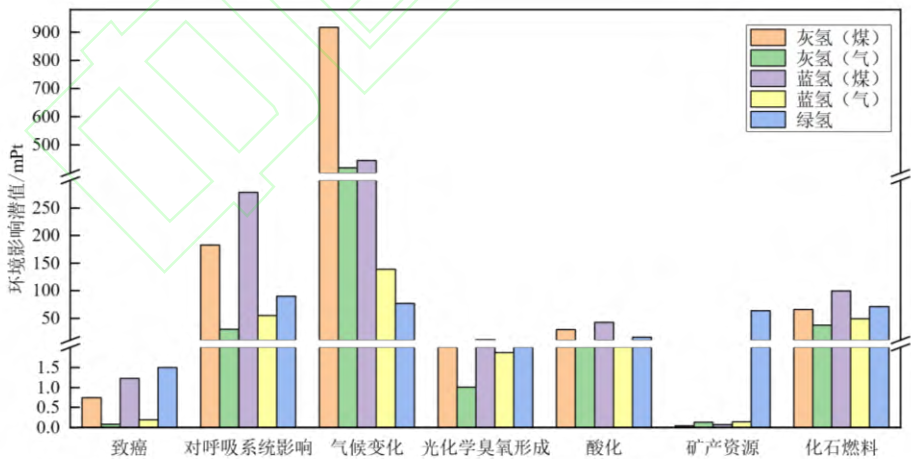


图 2 各氢能产品分类别环境影响评价结果

Fig. 2 Environmental impact assessment results by hydrogen energy product category

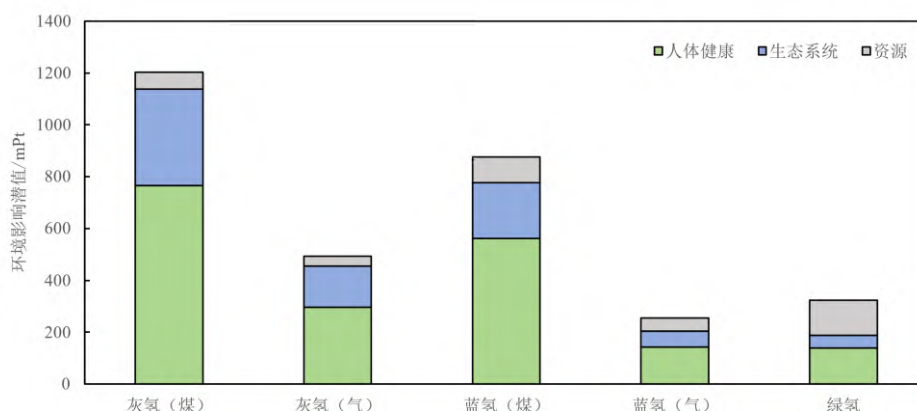


图 3 各氢能产品环境影响评价结果

Fig. 3 Evaluation results of environmental impact of each hydrogen product

各氢能产品各阶段的环境影响潜值占比如图 4 所示。灰氢（煤）气化制氢过程（81%）产生的环境影响潜值远高于煤炭获取过程（18%），其中直接向环境排放的污染物占比较大；灰氢（气）重整制氢阶段（83%）产生的环境影响潜值最大，直接排放的污染物贡献较大，天然气获取阶段（17%）次之。说明降低灰氢环境影响应重点关注污染物减排。

蓝氢（煤）系统的环境影响主要由气化制氢和 CCS 过程（74%）产生，电力与直接排放产生的环境影响较大。蓝氢（气）的重整制氢和 CCS 过程（47%）产生的环境影响潜值最大，主要由电力（66%）与直接排放（32%）贡献。可见降低蓝氢的环境影响不仅应重点关注污染物减排，还要关注降低电耗。

绿氢的环境影响主要由电力输入（53%）产生；电解装置（33%）次之，其中主要来自镍的贡献（71%）；构件部分（14%）最小。因此降低绿氢的环境影响，一方面可以降低电耗，另一方面可以通过技术提升，降低电解装置金属电极原料消耗和光伏发电过程的环境影响，进而使绿氢的环境影响整体下降。

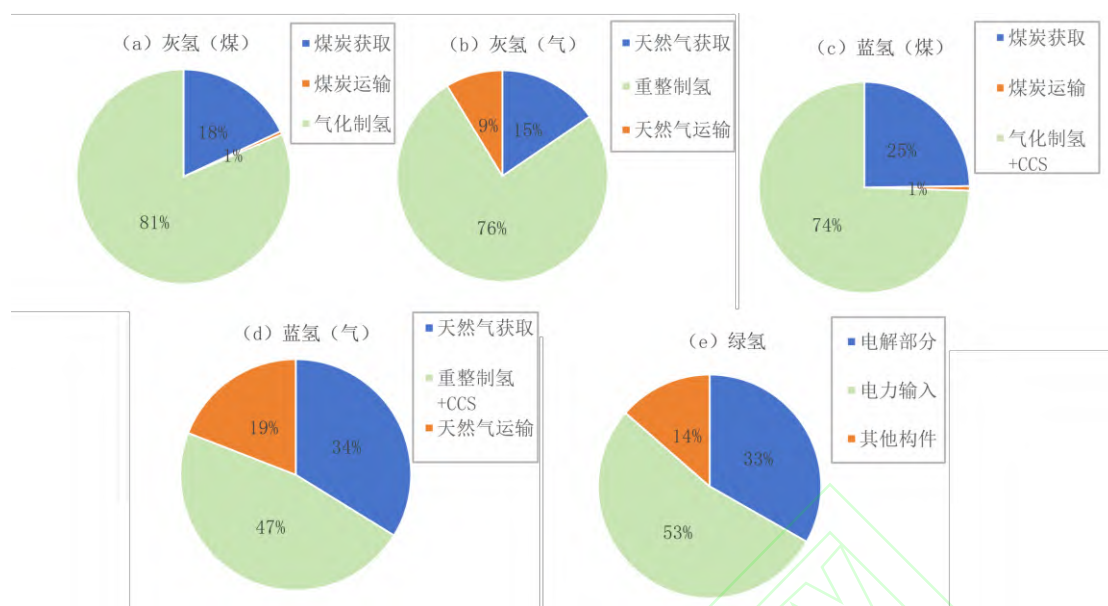


图 4 各氢能产品生产要素环境影响占比

Fig. 4 Percentage of environmental impact of production factors for each hydrogen product

## 2.2 碳足迹

生产 1 kg 氢气产品的全生命周期碳排放如图 5 所示，由小到大依次是绿氢、蓝氢（气）、灰氢（气）、蓝氢（煤）和灰氢（煤），分别为 1.97、3.47、10.97、11.07 和 23.79 kg（以  $\text{CO}_2\text{eq}$  计）。可以看出，绿氢的碳足迹显著低于其他氢能产品。

灰氢（煤）的碳排放最高，主要来自气化制氢过程（87%），这是因为煤气化合成气中的 CO 变换产生  $\text{H}_2$  时会产生大量的  $\text{CO}_2$ 。灰氢（气）重整制氢过程（87%）的碳排放也占比较大，主要是由于重整时将碳氢化合物和醇转化为氢的过程中会产生  $\text{CO}_2$ ，使用 CCS 技术的蓝氢在制氢过程产生的碳排放下降明显。绿氢的电力输入过程（61%）产生的碳排放最大，主要是由于提供电解水电力的光伏组件在制备过程中需消耗大量电力，而我国电力结构以煤电为主，故此过程的碳排放占比较高。生产 1 kg 各氢能产品的碳排放来源如表 4 所示，灰氢和蓝氢的碳排放除生产过程外，主要由电力输入产生。绿氢的碳排放主要由电力产生。

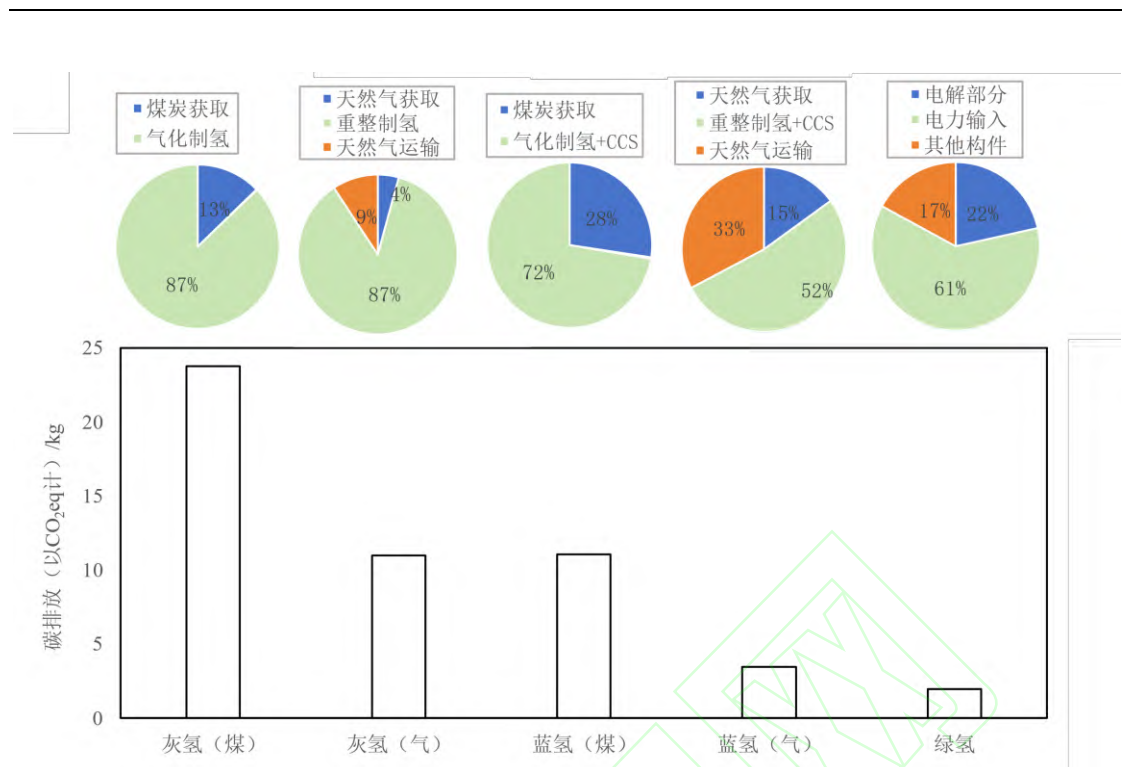


图 5 5 种氢能产品碳排放对比

Fig. 5 Comparison of carbon emissions of 5 hydrogen products

表 4 各氢能产品碳排放来源 (以 CO<sub>2</sub>eq 计) / kg

Table 4 Sources of carbon emissions for each hydrogen product (CO<sub>2</sub>eq) / kg

| 氢能产品 | 灰氢 (煤) | 灰氢 (气) | 蓝氢 (煤) | 蓝氢 (气) | 绿氢   |
|------|--------|--------|--------|--------|------|
| 直接排放 | 20.27  | 10.63  | 5.18   | 2.57   | 0    |
| 电力   | 3.48   | 0.26   | 5.82   | 0.81   | 1.21 |
| 其他   | 0.37   | 0.08   | 0.01   | 0.08   | 0.76 |

### 2.3 敏感性分析

从图 4 可知, 氢能产品的环境影响除直接排放的污染物外主要集中在电耗上, 其他资源消耗的环境影响较小, 因此选择直接排放与电力作为敏感性分析的因子, 对氢能产品生产过程生命周期环境影响进行敏感性分析. 每次对各系统中对应输入的数值增大、减少 10%, 计算其对应的氢能产品生产系统的环境影响潜值, 并与原结果进行比较, 如表 5 所示. 灰氢和蓝氢 (气) 为直接排放对环境影响潜值的影响较大, 绿氢和蓝氢 (煤) 则为电力, 因此对氢能产品生产系统的环境管理而言, 灰氢应重点削减直接产生排放, 蓝氢和绿氢在此基础上, 还要重点关注原材料替代和减量.

表 5 环境影响潜值敏感性分析/%

Table 5 Sensitivity analysis of environmental impact potential/%

| 要素   | 灰氢（煤） | 灰氢（气） | 蓝氢（煤） | 蓝氢（气） | 绿氢              |
|------|-------|-------|-------|-------|-----------------|
| 直接排放 | ±8.83 | ±8.64 | ±2.90 | ±4.89 | — <sup>1)</sup> |
| 电耗   | ±2.83 | ±0.45 | ±6.63 | ±3.13 | ±5.32           |

1) “—”表示绿氢无直接排放，故无敏感性分析结果

同样选择直接碳排放与电力作为敏感因子，对氢能产品生产过程碳足迹进行敏感性分析。结果如表 6 所示，生产过程中的直接排放对灰氢、蓝氢的全生命周期碳排放均较为敏感，电耗对蓝氢、绿氢的全生命周期碳排放均较为敏感。

表 6 碳足迹敏感性分析/%

Table 6 Sensitivity analysis of carbon footprint/%

| 氢能产品 | 灰氢（煤） | 灰氢（气） | 蓝氢（煤） | 蓝氢（气） | 绿氢              |
|------|-------|-------|-------|-------|-----------------|
| 直接排放 | ±8.51 | ±9.70 | ±4.68 | ±7.42 | — <sup>1)</sup> |
| 电耗   | ±1.39 | ±0.19 | ±5.08 | ±2.21 | ±6.14           |

1) “—”表示绿氢无直接碳排放，故无敏感性分析结果

## 2.4 不确定性分析

环境影响和碳足迹的量化需要大量活动水平数据以及排放因子数据，数据因为时空异质等因素存在不确定性，进而会对最终结果的准确性产生影响。因此基于误差传播方程<sup>[47]</sup>对各氢能产品生命周期清单数据的不确定性进行分析，以确保环境影响和碳足迹核算结果的准确性。

$$C_{ei} = \sqrt{C_{Fi}^2 + C_{Ri}^2} \quad (1)$$

$$C_{total} = \frac{\sqrt{(C_{e1} \times E_1)^2 + (C_{e2} \times E_2)^2 + \dots + (C_{ei} \times E_i)^2}}{E_1 + E_2 + \dots + E_i} \quad (2)$$

式中， $C_{ei}$ 为第  $i$  个阶段中环境影响类别或碳源计算的不确定性（%）； $C_{Fi}$ 为排放因子的不确定性（%）； $C_{Ri}$ 为各氢能系统活动水平数据的不确定性（%）； $C_{total}$ 为总的不确定性（%）； $E_i$ 为第  $i$  个阶段不同环境影响类别或碳源的量（mPt 或 kg）。

参考张晓梅等<sup>[48]</sup>研究，排放因子的不确定性和活动水平数据的不确定性分别取 10%和 5%。各氢能产品的不确定性分析结果如表 7 所示，最高不超过 10%。

表 7 不确定性分析结果/%

Table 7 Uncertainty analysis results/%

| 氢能产品 | 灰氢（煤） | 灰氢（气） | 蓝氢（煤） | 蓝氢（气） | 绿氢 |
|------|-------|-------|-------|-------|----|
|------|-------|-------|-------|-------|----|

|      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|
| 环境影响 | 9.33 | 8.70 | 8.78 | 6.82 | 7.17 |
| 碳排放  | 9.85 | 9.74 | 8.65 | 7.10 | 7.52 |

## 2.5 与 ReCiPe 方法对比

各氢能产品使用本地化终点损害类评价模型与 ReCiPe 模型的结果对比如图 6 所示。使用本地化终点损害类评价模型得出的环境影响潜值均较 ReCiPe 模型的高，灰氢（煤）、灰氢（气）、蓝氢（煤）、蓝氢（气）和绿氢分别高 121%、133%、123%、153%和 232%，两者评价结果差异较大。分类别环境影响中，各氢能产品的 ReCiPe 模型评价结果均为人体健康所占比例最大，占比均超过 90%，本地化终点损害类评价模型仍为人体健康所占比例最大，但占比有所下降。从上述对比结果可知，不同评价方法的结果差异较大，不同国家或地区的电力生产方式、能源来源和技术水平不同，本地化终点损害类评价模型适用中国实际情况，因此相较于其他模型更能反映实际情况，更加准确和可靠。

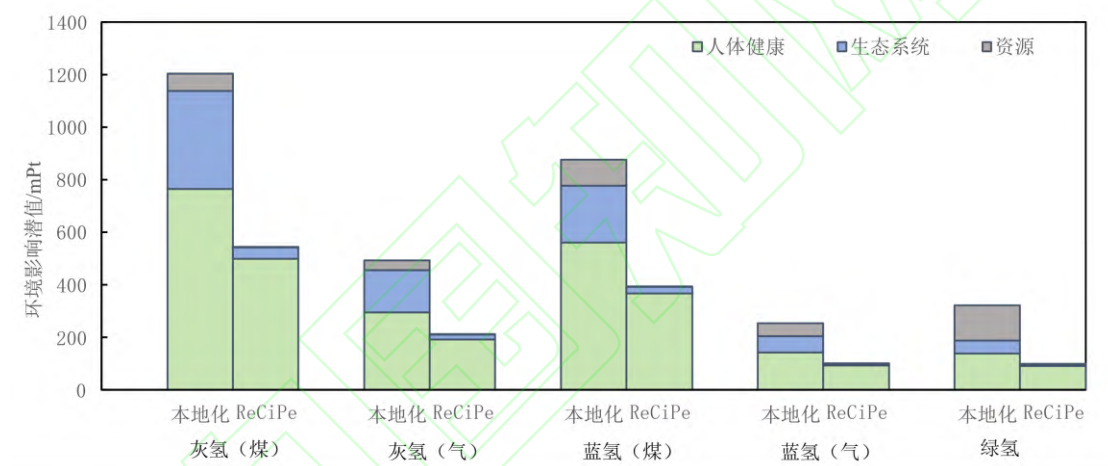


图 6 各氢能产品本地化方法与 ReCiPe 方法评价结果对比

Fig.6 Comparison of evaluation results between localization method and ReCiPe method for each hydrogen product

## 3 结论

(1) 从分类别的环境影响看，灰氢和蓝氢的环境影响主要集中在气候变化、对呼吸系统影响和化石燃料方面，绿氢的环境影响主要集中在气候变化、对呼吸系统影响、化石燃料和矿产资源方面。从环境影响的最终破坏终点来看，均主要集中对人体健康损害方面。

(2) 5 种氢能产品生命周期环境影响潜值由大到小依次是灰氢（煤）、蓝氢（煤）、灰氢（气）、绿氢和蓝氢（气），分别为 1203、876、492、323 和 252 mPt kg<sup>-1</sup>。绿氢略高于蓝氢（气），位于第 4 位。以煤为原料制氢对环境的影响远大于以天然气为原料制氢，应逐步降低煤制氢产品比例，提高加装 CCS 装置天然气制氢和绿氢产品比例。

(3) 5 种氢能产品按碳排放由小到大排序，依次是绿氢、蓝氢（气）、灰氢（气）、蓝氢



(煤)和灰氢(煤), 碳足迹(以  $\text{CO}_2\text{eq}$  计)分别为 1.97、3.47、10.97、11.07 和 23.79  $\text{kg kg}^{-1}$ . 绿氢碳排放最小, 在当前的碳中和背景下, 最具发展优势; 制氢原料相同时, 采用 CCS 技术的氢能产品碳排放明显减少.

(4) 在所有的环境要素中, 除污染物排放外, 电力引起的环境影响均较高, 敏感性分析结果显示, 降低氢能产品环境影响, 不仅要关注污染物减排和降低电耗, 还要关注原料替代和减量.

#### 参考文献:

- [1] 韩笑, 张兴华, 闫华光, 等. 全球氢能产业政策现状与前景展望[J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(12):27-34  
Han X, Zhang X H, Yan H G, et al. Current situation and prospect of global hydrogen energy industry policy [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(12):27-34.
- [2] 新华社. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[EB/OL].  
[https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm), 2021-03-13.
- [3] 中国氢能联盟. 中国氢能源及燃料电池产业白皮书[R]. 北京: 中国氢能联盟, 2020.
- [4] Markevich M, Sonnemann G W, Castells F, et al. Life cycle inventory analysis of hydrogen production by the steam-reforming process: comparison between vegetable oils and fossil fuels as feedstock[J]. Green Chemistry, 2002, 4(5): 414-423.
- [5] Spath P L, Mann M K. Life cycle assessment of hydrogen production via natural gas steam reforming [R]. Washington d c: office of energy efficiency & renewable energy, 2000.
- [6] Suleman F, Dincer I, Agelin-chaab M. Environmental impact assessment and comparison of some hydrogen production options[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(21): 6976-6987.
- [7] Amran U I, Ahmad A, Othman M R. Life cycle assessment of simulated hydrogen production by methane steam reforming[J]. Australian Journal of Basic & Applied Sciences, 2017, 11(113): 43-50.
- [8] Cetinkaya E, Dincer I, Naterer G F. Life cycle assessment of various hydrogen production methods[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(3): 2071-2080.
- [9] Ruether J, Ramezan M, Grol E. Life-cycle analysis of greenhouse gas emissions for hydrogen fuel production in the United States from LNG and coal[R]. Pittsburgh, U.S.A: U.S. Department of Energy/NET, 2005.
- [10] Sandeep K R, Shalini V, Abhishek G, et al. Environmental impact assessment of coal gasification in hydrogen production[A]. In: IOP Conference Series. Earth and Environmental Science[C]. United Kingdom: IOP Publishing Ltd, 2021, 795.
- [11] Lombardi L, Carnevale E, Corti A. Life cycle assessment of different hypotheses of hydrogen production for vehicle fuel cells fuelling[J]. International Journal of Energy and Environmental Engineering, 2011, 2(3): 63-78.
- [12] Ghandehariun S, Kumar A. Life cycle assessment of wind-based hydrogen production in Western Canada [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(22): 9696-9704.
- [13] Reiter G, Lindorfer J. Global warming potential of hydrogen and methane production from renewable electricity via power-to-gas

- 
- technology[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2015, **20**(4): 477-489.
- [14] Ozbilen A, Dincer I, Rosen M A. Comparative environmental impact and efficiency assessment of selected hydrogen production methods[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2013, **42**(42): 1-9.
- [15] Hajjaji N, Martinez S, Trably E, *et al.* Life cycle assessment of hydrogen production from biogas reforming[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, **41**(14): 6064-6075.
- [16] 李奕阳. 几种制氢方法的生命周期评价研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
- Li Y Y. Research on evaluating the several methods of hydrogen production technology by life cycle assessment[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010.
- [17] 孔德洋, 唐闻翀, 柳文灿, 等. 燃料电池汽车能耗、排放与经济性评估[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, **46**(4): 498-503, 523.
- Kong D Y, Tang W C, Liu W C, *et al.* Energy consumption, emissions and economic evaluation of fuel cell vehicles[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, **46**(4): 498-503, 523.
- [18] Liu Huan, Liu Shuqin. Life cycle energy consumption and GHG emissions of hydrogen production from underground coal gasification in comparison with surface coal gasification[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, **46**(14): 9630-9643.
- [19] 赵佳康. 中国可再生能源弃电电解水制氢系统全生命周期评价及应用潜能分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- Zhao J K. Life cycle assesment and application potential analysis of hydrogen from abandoned renewables via water electrolysis in China[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [20] 林婷, 吴焱, 何晓旖, 等. 中国氢燃料电池车燃料生命周期的化石能源消耗和 CO<sub>2</sub> 排放[J]. 环境科学, 2018, **39**(8): 3946-3953.
- Lin T, Wu Y, He X Y, *et al.* Well-to-wheels fossil energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions of hydrogenfuel cell vehicles in china[J]. Environmental Science, 2018, **39**(8): 3946-3953.
- [21] 刘佳慧. 氢燃料电池汽车生命周期评价研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- Liu J H. Life cycle assessment of hydrogen fuel cell vehicle[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [22] 付佩, 兰利波, 陈颖, 等. 面向 2035 的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价[J]. 环境科学, 2023, **44**(4): 2365-2374.
- Fu P, Lan L P, Chen Y, *et al.* Life cycle prediction assessment of energy saving and new energy vehicles for 2035[J]. Environmental Science, 2023, **44**(4): 2365-2374.
- [23] 姚东. 基于可再生能源的清洁燃料汽车生命周期评价研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2022.
- Yao D. Life cycle assessment of clean fuel vehicles based on renewable energy[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2022.
- [24] 陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 等. 氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比[J]. 环境科学, 2022, **43**(8): 4402-4412.
- Chen Y S, Lan L B, Hao Z, *et al.* Life cycle assessment and key parameter comparison of hydrogen fuel cell vehicles power systems [J]. Environmental Science, 2022, **43**(8): 4402-4412.
- [25] 马菁, 蔡旭, 张春梅, 等. 考虑区域特点和车型差异的氢燃料电池汽车全生命周期减碳预测分析[J]. 环境科学, 2024, **45**(2), doi: 10.13227/j.hjcx.202303067.
- Ma J, Cai X, Zhang C M, *et al.* Carbon Reduction analysis of life cycle prediction assessment of hydrogerfuel cell vehicles:

- considering regional features and vehicles type differences[J]. *Environmental Science*, 2024, **45**(2), doi: 10.13227/j.hjxx.202303067.
- [26] 张硕, 张春梅, 蔡旭, 等. 面向 2035 年的氢燃料与柴油重型商用车全生命周期环境影响预测研究[J]. *环境科学研究*, 2023, **36**(10): 1892-1904.
- Zhang S, Zhang C M, Cai X, *et al.* Life cycle prediction assessment of hydrogen fuel cells and diesel heavy-duty commercial vehicles for 2035[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, **36**(10): 1892-1904.
- [27] Li J, Wei Y M, Liu L, *et al.* The carbon footprint and cost of coal-based hydrogen production with and without carbon capture and storage technology in China[J]. *Journal of cleaner production*, 2022, **362**, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132514.
- [28] Al-Qahtani A, Parkinson B, Hellgardt K, *et al.* Uncovering the true cost of hydrogen production routes using life cycle monetisation[J]. *Applied Energy*, 2021, **281**, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115958.
- [29] 丁宁, 杨建新. 中国化石能源生命周期清单分析[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(5): 1592-1600.
- Ding N, Yang J X. Life cycle inventory analysis of fossil energy in China[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(5): 1592-1600.
- [30] 张廷首. 液化天然气的运输方式及其特点分析[J]. *化工设计通讯*, 2020, **46**(3): 238-255.
- Zhang T S. Analysis on the transportation mode and characteristics of LNG[J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2020, **46**(3): 238-255.
- [31] 狄文霞, 夏萍. 基于成本监审的天然气管道运输成本核算探析[J]. *财务与会计*, 2023, (3): 59-61.
- Di W X, Xia P. Exploration of natural gas pipeline transportation cost accounting based on cost audit[J]. *Finance & Accounting*, 2023, (3): 59-61.
- [32] 蒋慧. 液化天然气(LNG)不同应用情景的生命周期评价及优化分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- Jiang H. Life cycle assessment and optimization analysis of different liquefied natural gas (LNG) usage scenarios [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [33] 武琛昊, 孙启宏, 段华波, 等. 基于生命周期评价的光伏产业技术进步与经济成本分析[J]. *环境工程技术学报*, 2022, **12**(3): 957-966.
- Wu C H, Sun Q H, Duan H B, *et al.* Technology progress and economic cost analysis of photovoltaic industry based on life cycle assessment[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, **12**(3): 957-966.
- [34] 崔素萍, 黎瑶, 李琛, 等. 水泥生命周期评价研究与实践[J]. *中国材料进展*, 2016, **35**(10): 761-768.
- Cui S P, Li Y, Li C, *et al.* Research and application of life cycle assessment in cement industry[J]. *Materials China*, 2016, **35**(10): 761-768.
- [35] 宋晓聪, 杜帅, 邓陈宁, 等. 钢铁行业生命周期碳排放核算及减排潜力评估[J]. *环境科学*, 2023, **44**(12): 6630-6642.
- Song X C, Du S, Deng C N, *et al.* Life cycle carbon emission accounting and emission reduction potential assessment of steel industry [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(12): 6630-6642.
- [36] 张言璐. 我国电解铝与再生铝生产的生命周期评价[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- Zhang Y L. Life cycle assessment of aluminum production in China [D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [37] 王彦哲, 周胜, 姚子麟, 等. 中国煤电生命周期二氧化碳和大气污染物排放相互影响建模分析[J]. *中国电力*, 2021, **54**(8): 128-135.

- 
- Wang Y Z, Zhou S, Yao Z L, *et al.* Life cycle modeling analysis of the interaction between carbon dioxide and air pollutant emissions of coal power in China[J]. *Electric Power*, 2021, **54**(8): 128-135.
- [38] 侯燕楠. 生命周期评价在氧化铝工业清洁生产审核中的应用[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- Hou Y N. Application of LCA in cleaner production audit of alumina industry[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [39] 杜家益, 吉炎, 袁银男, 等. 煤基甲醇和天然气基甲醇燃料的生命周期影响评价[J]. *可再生能源*, 2012, **30**(8): 78-82.
- Du J Y, Ji Y, Yuan Y N, *et al.* Life cycle impact assessment of coal-based methanol and natural gas-based methanol fuel[J]. *Renewable Energy Resources*, 2012, **30**(8): 78-82.
- [40] 樊欢欢, 王洪涛, 谢阿弟, 等. 精炼铜行业的生命周期节能减排目标评价[J]. *生态毒理学报*, 2014, **9**(4): 737-743.
- Fan H H, Wang H T, Xie A D, *et al.* Life cycle energy conservation and emission reduction targets assessment of refined copper industry [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2014, **9**(4): 737-743.
- [41] Lee Y J, Lee S D, Hong S I, *et al.* Conceptual design and simulation study for the production of hydrogen in coal gasification system[J]. *International journal of hydrogen energy*, 2010, **35**(23): 12970-12975.
- [42] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [43] 中华人民共和国国家统计局. 国家数据[EB/OL]. 北京: 中华人民共和国统计局, <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>, 2023-10-15.
- [44] 中国交通年鉴社编辑. 中国交通年鉴 2017 年[M]. 北京: 中国交通年鉴社, 2017.
- [45] Hondo H. Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case[J]. *Energy*, 2005, **30**(11-12): 2042-2056.
- [46] 李雪迎, 白璐, 杨庆榜, 等. 我国终点型生命周期影响评价模型及基准值初步研究[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(11): 2778-2786.
- Li X Y, Bai L, Yang Q B, *et al.* Preliminary study on endpoint life cycle impact assessment model and normalisation value in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(11): 2778-2786.
- [47] IPCC. Good practice guidance and uncertainty management international greenhouse gas inventories[EB/OL]. [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/chinese/gpgaum\\_cn.html](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/chinese/gpgaum_cn.html), 2001-06-15.
- [48] 张晓梅, 庄贵阳, 刘杰. 城市温室气体清单的不确定性分析[J]. *环境经济研究*, 2018, **3**(1): 8-18.
- Zhang X M, Zhuang G Y, Liu J. Uncertainty analysis of urban greenhouse gas inventories[J]. *Journal of Environmental Economics*, 2018, **3**(1): 8-18.