

基于中国国情的绿色低碳甲醇发展路径研究

刘科^{1,2*}, 江锋浩^{1,2}, 张旭升², 胡顺轩¹, 胡彪², 王欣²,
翁力¹, 李俊国¹, 陈世和³, 姜鸿起³, 沈源⁴

(1. 南方科技大学创新创业学院, 广东深圳 518055; 2. 南方科技大学理学院化学系, 广东深圳 518055;
3. 华润电力控股有限公司, 广东深圳 518052; 4. 浙江吉利控股集团有限公司, 杭州 310051)

摘要: 绿色低碳甲醇作为液态能源载体, 契合我国丰富的风光资源及煤炭资源禀赋与现有能源结构特征, 具备规模化生产、低碳化发展的现实基础与战略价值, 其发展可有效协同破解我国煤炭清洁高效利用、土地荒漠化治理和新能源消纳等多重难题, 降低石油对外依赖度及助力实现“双碳”目标等多重挑战, 实现传统能源、可再生能源、粮食和生态治理的有机结合。本文聚焦在“双碳”目标下的绿色低碳甲醇减排潜力, 系统梳理其在交通、工业、农业等终端领域的应用优势, 提出基于传统煤制甲醇的低碳化改造路径, 构建涵盖低碳制备、土地治理、远距离输送、多场景应用的甲醇经济发展蓝图。并从制备工艺优化、终端利用拓展、储运体系建设、碳排放核算方法完善、民用化标准制定及能源属性界定等六个维度提出建议。倡导以新能源视角重构甲醇监管框架与标准化体系, 推动产业由“煤制甲醇”向耦合新能源和土地治理的“绿色低碳甲醇”升级。发展绿色低碳甲醇可为我国能源结构多元化发展、能源安全与粮食安全保障、“双碳”目标实现提供重要支撑。

关键词: 绿色低碳甲醇; 能源安全; 甲醇经济; 能源转型; 碳达峰、碳中和

中图分类号: TK 文献标识码: A

Pathways for Green Low-Carbon Methanol Development Based on China's National Conditions

Liu Ke^{1,2*}, Jiang Fenghao^{1,2}, Zhang Xusheng², Hu Shunxuan¹, Hu Biao², Wang Xin²,
Weng Li¹, Li Junguo¹, Chen Shihe³, Jiang Hongqi³, Shen Yuan⁴

(1. School of Innovation and Entrepreneurship, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, Guangdong, China;
2. Department of Chemistry, College of Science, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, Guangdong, China; 3. China Resources Power Holdings Company Limited, Shenzhen 518055, Guangdong, China; 4. Zhejiang Geely Holding Group, Hangzhou 310051, China)

Abstract: Green low-carbon methanol, as a liquid energy carrier, is well suited to China's resource endowment of abundant wind, solar, and coal resources and to its current energy structure. It has a realistic basis and strategic value for large-scale and low-carbon development. The development of green low-carbon methanol can contribute to solving several key challenges in an integrated manner, including clean utilization of coal, soil improvement, renewable energy consumption, reduced dependence on imported oil, and carbon neutrality. It also enables the coordinated integration of conventional energy, renewable energy, food production, and

收稿日期: 2025-12-16; 修回日期: 2026-01-29

通讯作者: *刘科, 南方科技大学创新创业学院讲席教授, 澳大利亚技术科学与工程院外籍院士, 主要研究方向为清洁能源与甲醇经济;
E-mail: liuk@sustech.edu.cn

资助项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC2909802); 广东省科技计划项目(2016ZT06N532)

本刊网址: ssc.ae.engineering.org.cn

ecological governance. This study focuses on the emission reduction potential of green low-carbon methanol in the context of carbon peaking and carbon neutrality. It examines the advantages of green low-carbon methanol in end-use substitution across transportation, industrial, and agricultural sectors. Moreover, it proposes pathways for the low-carbon transformation of conventional coal-to-methanol production and develops a blueprint for a methanol economy covering low-carbon production, soil improvement, long-distance transportation, and multi-scenario application. The study further provides recommendations in six aspects: production pathway optimization, expansion of end-use application, transportation system construction, adjustment of carbon emission accounting methods, formulation of standards for civilian use, and reconstruction of methanol's energy attributes. From the perspective of new energy, it proposes the establishment of a regulatory and standardization system for methanol to promote the transition from coal-based methanol to green low-carbon methanol integrated with renewable energy and soil improvement. The development of green low-carbon methanol can provide an important support for China in diversifying its energy structure, safeguarding its energy and food security, and gradually achieving the carbon peaking and carbon neutrality goals.

Keywords: green low-carbon methanol; energy security; methanol economy; energy transition; carbon peaking and carbon neutrality

一、前言

“双碳”目标的本质是基于碳循环的能源结构变革，第29届联合国气候变化大会发布的《2024年全球碳收支》指出，2024年全球CO₂排放量近4.16×10¹⁰ t，其中89%以上源自化石能源利用，其他排放则来自土地利用，如森林砍伐和火灾等^[1]。煤炭近中期的作用主要是保供，而长期的作用则转为减碳降碳^[2]。我国能源资源禀赋决定了煤炭是保障能源供给安全稳定的“压舱石”“稳定器”，煤炭的供给弹性、煤电的稳定性与灵活性、煤化工产业的多样性都为能源供应链的安全稳定贡献了重要力量。因此，中短期内传统化石能源（煤炭和石油）依旧是我国的主体能源，碳排放压力巨大，如何实现高碳排放端的低碳化发展是重中之重。“减排”和“增汇”是实现国家“双碳”目标的根本路径，如何构建能源领域碳排放近零发展路径与固碳端生态负碳化发展路径尤为关键。

当前，我国能源体系面临着资源分布与需求区域错配的突出矛盾。西部地区风光资源和煤炭储量丰富，而能源需求主要集中在东部负荷中心，这种空间错位造成了能源调配的巨大挑战。以新疆为例，其具有突出的“风光”资源优势，新疆的太阳能资源储量约为4.2×10⁹ kW，约占全国的26.9%，位居全国第一；风能资源储量约为1×10⁹ kW，约占全国的18%；煤炭资源非常丰富，预测储量约为2.19×10¹² t，占全国总储量的40%以上。但是，新疆是我国荒漠化、沙化土地面积最大的地区，其荒漠化土地面积达1.068 6×10⁶ km²（约为16亿亩），占新疆土地面积的64.18%、占全国荒漠化土地面积的41.52%；沙化土地面积达7.468×10⁵ km²（约为11.2亿亩），涉及90%的县（市、区），占新疆土地

面积的44.86%、占全国沙化土地面积的44.25%。

光伏、风电基地建设在“沙戈荒”类土地上，风光资源条件优越，但环境恶劣，浮尘日、雷暴日、沙尘暴较多，对光伏/风电/光热电站的规划、建设、维护和经济开发带来了诸多挑战，为此推进荒漠化防治与“风电、光伏”一体化工程建设，促进风电、光伏产业与防沙治沙融合发展将是关键。

同时，随着人工智能技术的快速发展，中国将迎来新一轮能源需求增长。在推进能源低碳转型的过程中，需统筹发展与减排，协同实现“双碳”目标与经济社会发展。为此，如何使我国已建成及即将投入的规模巨大的太阳能、风能、煤炭、石油、天然气等基础设施与装备持续高效利用，并最终实现碳中和是我国未来发展的重要任务。多种能源融合发展需要政府和市场双向发力，当前市场发挥的作用还不够充分，尚没有完全建立起市场化的机制和路径^[3]。“双碳”战略所需资金量庞大，决不可能依靠财政补贴得以实现，必须坚持市场导向，稳步推进。

立足国情、适应低碳发展需求，本文提出了一条基于中国国情的绿色低碳甲醇发展路径。该路径是破解我国“能源不可能三角”（经济可行、绿色低碳、安全可靠）的理想能源形式。绿色低碳甲醇（分子式CH₃OH）路径充分利用了我国最具成本优势的两大资源，即丰富的太阳能、风能资源与储量巨大的劣质煤资源，可实现甲醇的低碳规模化制备，该路径不仅能保障国家液体能源安全和粮食安全，在一定条件下可显著降低生命周期碳排放强度，推动能源结构绿色化转型并促进土地地力提升和生态环境改善。

为进一步阐明立足中国国情的绿色低碳甲醇发

展路径构建理念, 本文结合当前研究成果, 从甲醇的综合利用优势、行业发展态势、我国甲醇的战略定位与发展方向等角度, 系统论证和深入剖析构建甲醇能源体系的必要性, 并提出建设基于中国国情的绿色低碳甲醇体系发展路径, 旨在为我国甲醇经济发展提供参考, 助力碳达峰、碳中和目标的实现。

二、发展绿色低碳甲醇的意义

(一) 绿色低碳甲醇的定义

绿色低碳甲醇是指通过可再生电力、工艺优化与减排增汇, 使甲醇全生命周期温室气体排放强度降低至一定阈值的甲醇。在此框架下, 甲醇的功能不再局限于传统化工原料, 而可进一步拓展为长周期、跨季度的长时储能与能量传输载体。此时, 甲醇分子中的碳更多体现为能量运输的化学载体, 而非单纯为以物质形态被最终消耗的目标产品。因此, 绿色低碳甲醇的制备本质上是可将再生电力“充电”到液体化学载体中的能量转换与存储过程, 并通过土地治理增汇。作为能源载体, 绿色低碳甲醇的评价重点在于可核查的生命周期温室气体排放强度, 以及与之匹配的能量转化效率和单位甲醇能耗水平。同时, 可再生能源在总能耗中的占比与系统焓效率也是体现过程先进性与资源利用效率的关键指标。综合而言, 生命周期温室气体排放强度与经济性共同决定甲醇规模化应用的可行性, 因此, 两者在技术路线比较与工程放大讨论中尤为重要。

发展符合中国国情的绿色低碳甲醇意义重大, 绿色低碳甲醇能够将可再生能源与新疆、内蒙古地区大量的劣质煤资源高效结合, 可融合破解中国煤炭清洁化利用、土地荒漠化治理和新能源消纳, 降低石油对外依赖度及解决碳中和等难题, 实现传统能源、可再生能源、粮食安全和生态治理的有机结合(见图1)。传统煤制甲醇在生产过程中的碳排放因子可达180 g/MJ以上(原料煤不计入), 而绿色低碳甲醇生产过程中的碳排放因子(不考虑土壤碳汇)可低至40 g/MJ(原料煤不计入)。

我国的荒漠化土地面积为 $2.5737 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占国土面积的26.81%; 沙化土地面积为 $1.6878 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占国土面积的17.58%。我国荒漠化和沙化土地高度集中于新疆和内蒙古等西北地区, 其中, 新疆和内蒙古地区荒漠化、沙化地面积分别占全国的40%以上、20%以上。此外, 我国矿产资源开发造成的土地破坏面积高达 $3.627 \times 10^4 \text{ km}^2$, 主要分布在内蒙古和山西等地区。因此, 在西部地区, 可利用广袤的沙化地、荒漠地和矿区待复垦地等土地资源, 大规模布置风光发电设施, 通过电解水制氢装置实现绿氢绿氧的高效制备。同时, 利用微矿分离技术^[4]将西部地区丰富的劣质煤进行提质生产高热值碳源煤, 副产的天然矿物质与畜禽粪便及秸秆粉等有机质混合通过特殊培养的菌种发酵用于新型肥料(微矿肥)生产、沙土地改良和土地复垦、修复, 以提升农业生产土地地力、促进植被生长和增强陆地生态系统固碳能力, 既在利用煤炭的同时又实现了绿色生物质生产和土壤碳汇提升。

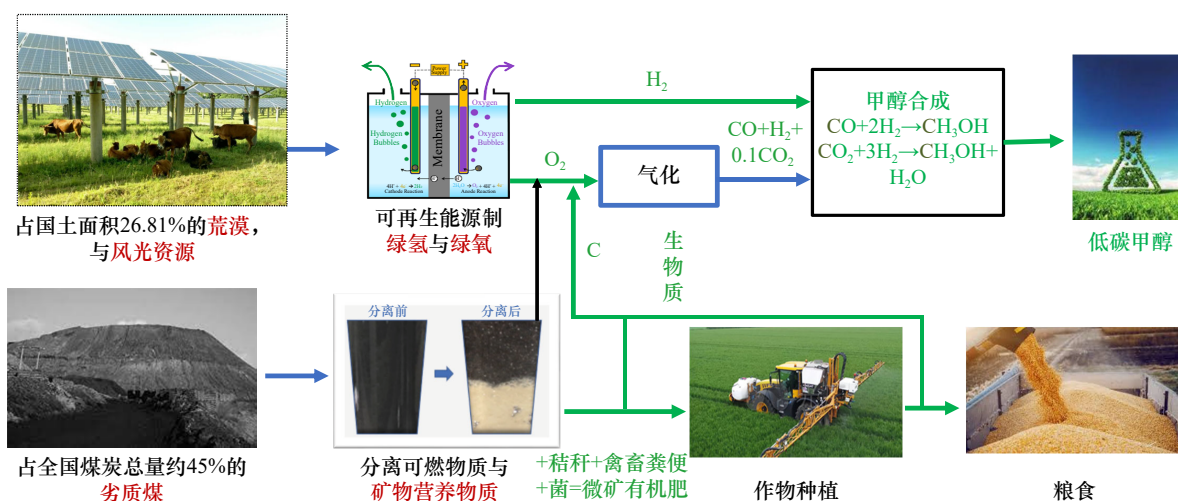


图1 符合中国国情的绿色低碳甲醇发展路径

在此基础上，将优质的碳源煤或板下的生物质与风光电解水制得的绿氢、绿氧通过合成工艺制得绿色低碳甲醇或绿色甲醇。随后，通过甲醇输运管网将其输送至东部地区，从而实现可再生能源的大规模储存与利用。这一创新模式将推动中国甲醇经济向低碳制造、安全储输、清洁利用方向发展，助力船舶、汽车和低空经济等“海陆空”交通设备的清洁化转型，加速农业农村清洁能源的推广，推动工业领域能源结构的多元化发展。此举既能在解决我国石油供应不足及进口石油带来的碳排放，又能让更多的土地在太阳能板下生态复绿，在保障粮食安全的同时为实现“双碳”目标和区域经济协调发展提供强力支撑。

(二) 绿色低碳甲醇对于中国能源发展的意义

发展绿色低碳甲醇不仅能保障国家液体能源安全和粮食安全，在一定条件下可显著降低生命周期碳排放强度，推动能源结构绿色化转型并促进国土地力提升和生态环境改善。2024年我国国内原油产量约为 2.13×10^8 t，而消费量约为 7.56×10^8 t，原油对外依存度仍处高位（约为72.2%）。国际环境变化引发的原油外部价格和供应扰动仍然较大，并对交通燃料和化工原料供应安全形成潜在影响。具有经济性的绿色低碳甲醇生产，可以形成对传统石油路线的结构性补充，从而在宏观层面提升国内液体能源安全的可控性。与此同时，以微矿分离为代表的分级分质路线可从煤及其衍生矿物质中获得富含微量元素的矿物细粉，用于复合微生物肥与土壤调理材料的制备，为作物养分供给与土壤结构改良提供矿物基底，促进盐碱地及沙土地障碍因子改善和地力提升，有助于确保我国耕地红线不破，保障粮食安全。

基于此，在绿色低碳甲醇实现规模化应用且绿色电网供给与绿色低碳甲醇管网等基础设施逐步完善的中长期情景下，甲醇可作为可再生能源的可运输液体化学储能介质，在提升国内液体能源供给韧性并降低对外部供应冲击敏感性的同时，为航运等难减排领域提供低碳燃料选项并推动需求侧转型，进而以绿色管网与绿色电网为核心（见图2），可构筑未来适合中国国情的碳中和能源体系，发展碳中和背景下的能源新质生产力。因此，构建基于绿色低碳甲醇的经济能源体系，逐步取代传统煤炭石

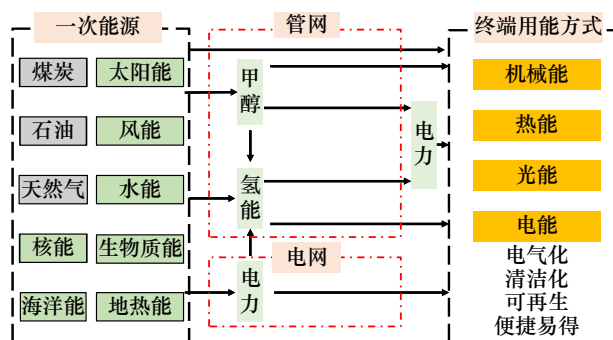


图2 未来我国的能源利用网络

油经济，可有效解决中国发展中的能源困境，助力碳中和目标的实现。

三、绿色低碳甲醇的制备

我国拥有丰富的风能、太阳能可再生能源资源，以及大量未充分开发利用的劣质煤资源。绿色低碳甲醇技术的应用不仅能显著降低碳排放，还能使国家已投入及未来规划的万亿级太阳能、风能、煤化工基础设施和装备实现持续高效利用。传统甲醇合成工艺主要以煤为原料（工艺流程见图3），每生产1 t MeOH将排放CO₂达3.5 t，且其自身完全燃烧后排放CO₂ 1.38 t。相比之下，基于可再生能源的绿色低碳甲醇系统通过引入足量的可再生能源制得的绿氢和绿氧，去掉传统工艺中的空气分离和水煤气变换单元。每吨绿色低碳甲醇使用后仅排放CO₂ 1.38 t，相比于传统工艺减碳率约为72%，同时协同提高生态碳汇。由于当前生态碳汇方法学较缺乏，绿色低碳甲醇体系协同产生的生态碳汇涉及多个碳循环过程和要素，其长期稳定性和碳核算方法有待在后续研究中进一步量化与验证。

(一) 传统煤制甲醇仍需提效降碳

基于煤气化与合成气制备路线的煤制甲醇工艺整体能源利用率普遍处于35%~45%，显著低于天然气制甲醇70%的水平。该工艺的能量利用率受到煤气化、空气分离、合成气变换及甲醇合成等关键工艺环节中热量损失和过程集成水平的限制。从能量损失占工艺总输入能量的角度来看，酸气脱除工艺（15.3%）、甲醇合成（14.5%）以及低品位余热（12%）是占比最大的3种能量损失方式。其中，在酸气脱除及甲醇合成环节中，气体或溶剂

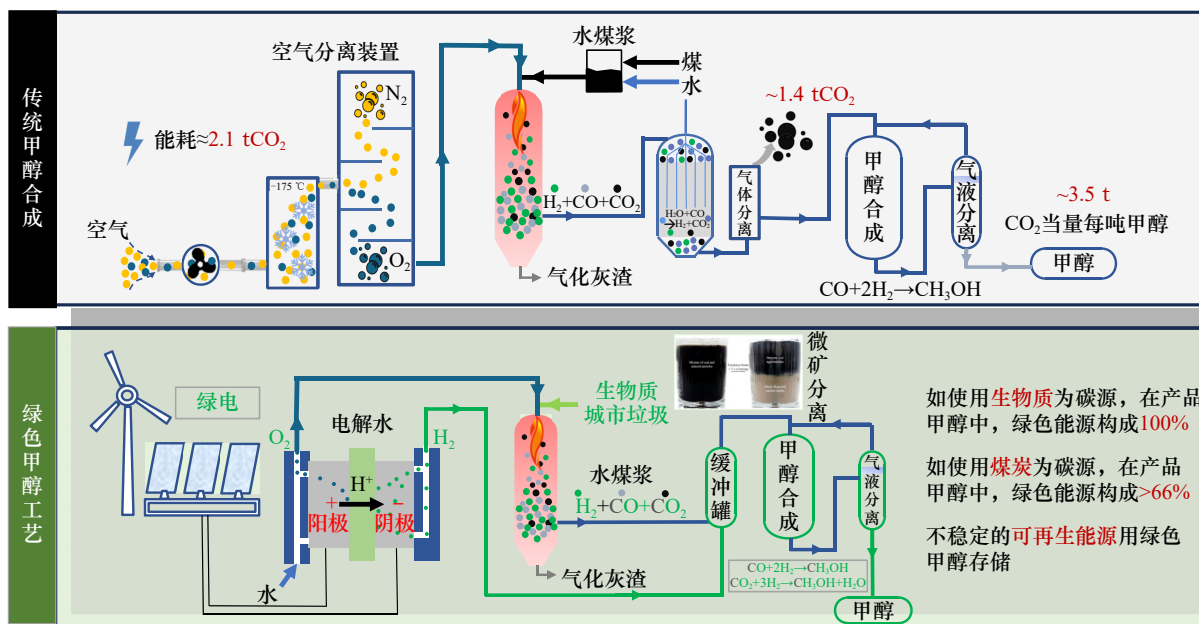


图3 传统甲醇与绿色低碳甲醇合成示意图

的循环以及反应气的温度控制是导致能量损失的关键因素，这表明煤制甲醇在能源高效利用方面仍具有较大的提升空间，且提高煤制甲醇的能量转化效率，可降低煤炭的消耗量进而实现低碳化目标。

在甲醇的全生命周期碳排放中，甲醇生产过程是最主要的排放来源，贡献了约90%的碳排放量。其中，煤制甲醇生产过程中的碳排放强度可达 $3.5 \text{ tCO}_2/\text{t MeOH}$ ，远高于其他甲醇生产路径。空气分离、气化单元、合成气变换及辅助单元是碳排放的主要来源。因此，提升煤制甲醇能源利用效率，发展低能耗空气分离技术，优化煤制甲醇工艺，并耦合绿电制氢/绿氧，是实现煤制甲醇低碳高效发展的关键技术路径。

(二) 绿色低碳甲醇可推动中国能源的清洁化

甲醇工业的减排是推动能源清洁化转型的重要环节，但在推动过程中必须遵循科学规律，坚持循序渐进原则，避免“一刀切”或运动式发展。存量煤制甲醇工业的低碳化改造是实现传统煤基甲醇向绿色低碳甲醇过渡的第一步。我国现有每年煤制甲醇产能约为 $9 \times 10^7 \text{ t}$ ，占全球甲醇产能的70%以上，存量设施的低碳化改造对行业低碳化转型具有决定性意义。在推进低碳化转型过程中，需在技术可行性和经济性之间寻求平衡，不能盲目追求短期的高

减排目标而忽视产业实际。传统煤制甲醇工艺的高碳排放特性主要是源于低能量转化率、空分制氧及合成气变换补氢。因此，绿色低碳甲醇的发展核心在于通过技术升级，将传统高碳工艺逐步转化为低碳排放工艺。具体而言，通过运用微矿分离技术制备清洁煤、风光耦合电解水制绿氢及绿氧、高浓度 CO_2 甲醇合成催化剂开发、化工厂能源管理系统优化、融合土地治理等技术改造升级，可在存量设施增加不到20%生产成本的前提下，实现80%的碳排放减排。这不仅为绿色低碳甲醇的工业化生产奠定了基础，还延长了现有设备的使用寿命，减少资本支出。

根据不同甲醇技术路径之间的相对差异与数量级水平，图4为不同路径下的甲醇制备工艺减碳率及生产成本增加率对比。如图4所示，随着减碳率的增加，甲醇生产成本呈指数型增长。其中， CO_2 加绿氢工艺是减碳率最高的路径，其通过捕集来自空气、化石能源或生物质等来源的 CO_2 ，与电解水制备的绿氢耦合，生产绿色甲醇，是实现甲醇低碳化生产的重要手段。然而，该工艺生产成本高昂，限制了其商业化应用，主要原因有以下几点：一是电解水副产的绿色氧气（每千克氢气副产约8 kg氧气）未能得到充分利用，通常被直接排放或低价值利用，未能耦合至气化或燃烧过程以替代高耗能的空分装置，导致资源浪费；二是 CO_2 分子化学稳定

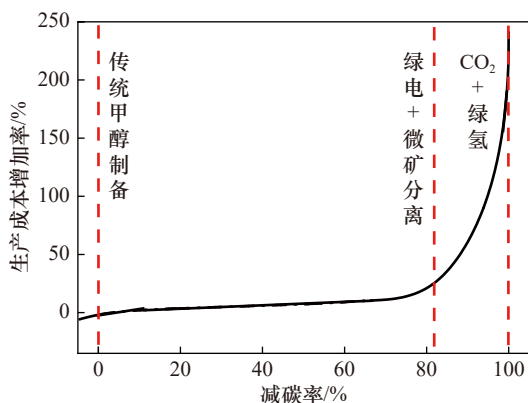


图4 甲醇低碳化进程中减碳率与生产成本增加率

性高，其加氢反应 ($\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$) 需消耗大量绿氢，其中约 1/3 的氢气转化为水，降低了氢气的利用效率。鉴于绿氢生产成本高（约 20 元/kg），这一效率损失显著推高了生产成本；三是化石行业（如燃煤电厂）来源的 CO_2 受欧盟绿色认证标准限制，不被视为完全绿色来源，需额外认证或处理，从而增加了工艺的合规成本；四是 CO_2 捕集成本高昂是主要限制瓶颈，化石行业烟气的 CO_2 捕集成本为 360~720 元/t CO_2 ，直接空气捕集成本则高达 1440~4320 元/t CO_2 ，这显著推高了绿色甲醇的生产成本，使其达到 6000 元/t，而传统甲醇成本不到 2400 元/t。而绿色低碳甲醇如果稳定绿电成本在 0.2 元/(kW·h)，使用廉价的劣质煤，结合使用微矿分离技术，绿色低碳甲醇成本可接近目前

的煤制甲醇。

（三）深度生态治沙，增汇效益显著

实现荒漠化和沙化土地面积大规模“双缩减”，亟需革新“沙漠土壤化”技术。我国低质煤资源储量丰富，而且整体利用效率较低。通过煤炭清洁高效利用新技术（如微矿分离技术，见图 5）对低质煤进行预处理，获得清洁固体燃料用于发电/调峰；微矿分离过程副产的天然远古矿物质（SRM），是一种超细复合矿物，可提供作物养分并具有较强的黏结性和吸水性，可用于土壤改良及沙土地治理。

SRM 是优质的沙漠土壤结构调节剂。向沙土中补充基于微米尺度 SRM 颗粒的土壤调理剂，以改善沙土土壤结构，随着种植过程中的灌溉 SRM 不断向下迁移，沙土结构重塑成“下黏上松”的理想土壤剖面，形成天然保水层，显著提高土壤的持水保肥和抗侵蚀能力。以内蒙古鄂尔多斯地区的库布齐沙漠沙土改良为例，在模拟半湿润条件下，施用 SRM 改良剂后，相比于未施用，苜蓿的生长得到显著促进，苜蓿总产量（干物质量）连续两季提高了 40% 以上。该技术成果耦合新疆和内蒙古沙漠地区光伏发电项目将加速光伏板下的沙地治理。目前，该项技术正在新疆和田沙漠地区开展规模化应用示范。

在沙漠地区开展生态农业种植，有机结合光伏发电项目，有望实现粮食等绿色高品质农产品培



图5 微矿分离示意图

育。利用光伏板遮挡部分阳光，减少地面蒸发，同时降低风速，减少土壤流失，最终实现新能源战略与生态农业的协同发展。此外，在光伏板下种植牧草，同时引入家禽家畜养殖，可促进沙漠地区农牧业发展和沙地地力提升。利用光伏板遮挡部分阳光以降低地面温度，减少水分蒸发；清洗光伏板的水可以用来灌溉牧草，提高牧草存活率和产量；畜禽食用牧草后产生的粪尿为沙地提供有机、无机养分。

四、绿色低碳甲醇的用途及优势

（一）绿色低碳甲醇的用途

1. 高性能的内燃机燃料

甲醇的辛烷值约为110，对应汽油标号为110，使其能够支持发动机采用更高压缩比，从而提升热效率并间接降低油耗。Verhelst等^[5]从甲醇的基本物化特性、燃烧反应动力学、甲醇混合燃料特性、发动机及整车设计、甲醇内燃机的运行状况等多个方面，系统分析了甲醇作为内燃机燃料的特性，指出甲醇和乙醇是仅有的两种碳数低于4，但辛烷值大于100的燃料，因此，甲醇成为极具吸引力的燃料扩展替代品之一。Karvounis等^[6]通过对甲醇特性、发动机设置和喷射特性、发动机性能参数以及排放参数的系统性分析，指出甲醇是汽车和船舶等内燃机行业理想的替代燃料。吉利控股集团有限公司在贵阳、晋中、西安等地的4万辆甲醇汽车的运行结果显示，燃用甲醇的出租车，百千米油耗约为3.4 L，每年可节省约4万元左右的燃料费用^[7,8]。燃用甲醇的重型卡车，百公里油耗约为90 L，每年可节省约10万元的燃料费用。因此，甲醇在车辆交通领域的应用，相较于汽油、柴油具有显著优势，是最有潜力的汽车代用燃料^[9]。

甲醇冰点低且含氧量高，特别适用于高海拔与极寒地区的燃料储运及使用需求。甲醇的冰点为 $-94.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，显著低于汽油（ $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）和柴油（ $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ），在寒冷环境下不易结冰，适用范围更广泛。此外，甲醇的含氧量高达50%，使其在燃烧过程中能够更充分地与氧气反应，从而在东北、西藏、新疆等高寒地区展现出更佳的运用效果。2025年，在吉利控股集团有限公司的技术支持下，哈尔滨亚洲冬季运动会成功采用甲醇车辆作为赛事专用服务车，验证了甲醇燃料在极寒条件下的可靠性和实用性。

甲醇还具有更好的通用性。现有燃油车经过简易改造与配件升级后即可燃用甲醇，且适配内燃机改造。传统内燃机经过材料升级（如抗腐蚀部件）和控制系统调整后即可使用甲醇燃料，无需彻底重构动力系统，改造费用仅需花费数千元。

以甲醇内燃机为动力，耦合发电机及电池，运用于分布式能源场景，燃料成本仅为柴油的1/3，与天然气相当，且配合储能系统可节省30%~60%的燃料费用。在环保性能方面，排放物中的CO、HC和NO_x排放显著降低，并实现接近无颗粒物排放（降低98%）；且点燃式甲醇发动机噪音显著低于传统压燃式柴油发动机。这种系统可广泛应用于离网充电桩、内河货运船舶、矿区用电、城市应急、岛屿供能等微电网场景。同时，通过与高温储热、低温储热、溴化锂余热机组、热泵等技术耦合，可满足工业供电、供蒸汽、供冷及供生活用水需求，实现能源的综合高效利用，能源效率可达80%以上。

甲醇内燃机在船舶领域的应用已成为推动绿色航运的重要技术路径。在远洋航运领域，甲醇低速机通过直接燃用甲醇作为主动力，具有清洁高效、燃料供应链成熟、燃料物性稳定、替代成本低等显著优势。而且，甲醇可实现船舶动力系统的低碳化升级，符合国际海事组织（IMO）逐步收紧的碳减排及污染物排放标准，已成为全球知名船东公司在大型货轮、油轮、集装箱船等远洋主力船型的重要燃料替代方案。当前，远洋航运燃料市场达万亿级别，甲醇燃料在远洋航运中的广泛应用，将成为推动甲醇燃料市场发展成为万亿级产业的重要基石。在内河航运领域，甲醇增程式电动化技术路径通过小型甲醇发电机组提供电能，并配合电池系统实现船舶全程电驱动，具有噪音低、排放少、操作灵活等优势。该技术特别适用于内河物流、渡船以及城市水上交通等应用场景，兼顾能源供应便利性与环保性能。目前，国内的汉马科技集团股份有限公司、广东逸动科技有限公司、中和智慧能源科技（深圳）有限公司等企业正在积极推动相关技术的产业化应用。总体而言，甲醇在船舶动力领域的灵活适配性与广泛的资源基础，使其成为实现远洋与内河航运绿色低碳转型的重要选择。

与此同时，甲醇凭借其在内燃机系统中的清洁燃烧特性，已成为低空经济场景中极具潜力的优选

燃料之一。其不仅适用于高压压缩比发动机，而且在燃烧过程中的颗粒物（PM）、NO_x和CO排放显著低于传统汽油和柴油，有助于改善低空飞行器运行环境下的污染水平。甲醇还具有高储能密度、低成本和运输便利等优势，特别适合于在无人机、电动垂直起降飞行器（eVTOL）、低空货运物流平台等轻型飞行器中推广应用。随着绿色低碳甲醇产量的提升及成本的下降，其全生命周期碳排放亦将显著降低，从而实现能源安全与环保性能兼顾。因此，甲醇是低空经济绿色动力系统发展的重要方向。

2. 优质的工业燃料

相较于传统化石燃料（如天然气、煤和重油），甲醇在火焰特性、燃烧效率和环境友好方面展现出显著优势。甲醇的理论火焰温度约为2150℃（绝热条件下），工业锅炉中的实际火焰温度为1800~1900℃，完全满足高温工艺需求。尽管其火焰温度略低于天然气（约2300℃）和重油（约2200℃），但甲醇的高氧含量（50%）特性能促进完全燃烧，有效减少局部高温区域，从而降低NO_x的生成^[10]。在燃烧效率方面，甲醇的层流火焰传播速度可达40~50 cm/s，高于天然气（35 cm/s）和重油（20~30 cm/s），这表明其燃烧反应活性更高，点火和燃烧过程更迅速，适用于高负荷燃烧设备的高效响应^[11]。此外，甲醇火焰具有优异的稳定性，其燃烧极限范围（空气中体积分数为6.7%~36%）显著宽于天然气（5%~15%），这不仅降低了熄火风险，而且在湍流燃烧条件下仍能保持稳定的火焰结构，充分适应复杂的燃烧环境。从环境影响来看，甲醇燃烧产生的淡蓝色的火焰因其低碳含量和无芳烃结构，辐射热量较重油低约30%~40%，有效减轻燃烧设备的热应力，从而延长设备使用寿命^[12,13]。此外，甲醇自身含氧，其在工业应用过程中产生的烟气量仅为天然气的50%，这为工业设备的小型化改造提供了重要空间^[14]。在实际工业应用中，甲醇燃料已展现出显著优势。例如，2022年北京冬季奥运会的陶瓷版吉祥物采用了甲醇燃料陶瓷烧制技术，其烧成白度较液化气提高了3度，红色杯子的烧结色彩还原性更好，色彩更鲜艳。同样，在2022年杭州亚洲运动会中采用了吉利控股集团有限公司的绿色甲醇方案，首次采用甲醇燃料火炬，利用甲醇的层流火焰速度（40~50 cm/s）实现了火焰形态可控^[15]。

3. 清洁环保的民用代煤燃料

如图6所示，与散煤、天然气、电加热及热泵等传统民用供暖技术相比，甲醇供暖在供暖成本、CO₂排放、SO_x与NO_x排放等多个维度具有一定优势。甲醇供暖在实现较低运行成本的同时，可显著减少CO₂及大气污染物排放，具有较好的环境友好性与经济适应性，显示出其作为清洁供暖燃料的潜力。需要指出的是，尽管当前甲醇供暖设备初期投资成本相对较高，主要受限于尚未实现大规模商业化应用，但随着推广力度的加大和产业链的逐步完善，设备成本有望持续下降，从而进一步提升其市场竞争力。

在实际应用中，甲醇供暖技术已取得显著成效。以开滦能源化工股份有限公司范各庄矿业分公司的供暖改造为例，该公司于2017年10月完成了4台20 t燃煤蒸汽锅炉改用醇基（甲醇）燃料供暖工程。改造后，锅炉热效率显著提升至95.23%，比原燃煤锅炉提高了30%以上。以保障供热面积4.13×10⁵ m²为基准，改造后每个供暖期可减少烟尘、CO₂和NO_x排放量分别为5 t、35 t和21 t^[16,17]。

在农业大棚供暖领域，本研究团队在山东寿光、天津静海、内蒙古赤峰、河北固安、宁夏固原等9个典型地区，针对西红柿、甜瓜、西瓜、育苗、蔬菜等6种大棚作物，开展了甲醇供暖系统的实地试验研究。如表1所示，由于甲醇供暖系统具有快速启停和变负荷调节能力，类似于电加热系统，无需采用固体燃料的压火运行模式，其运行成本较燃煤、生物质、电加热供暖分别降低了约5%、16%、8%，仅高于地源热泵。在污染物减排方面，甲醇供暖表

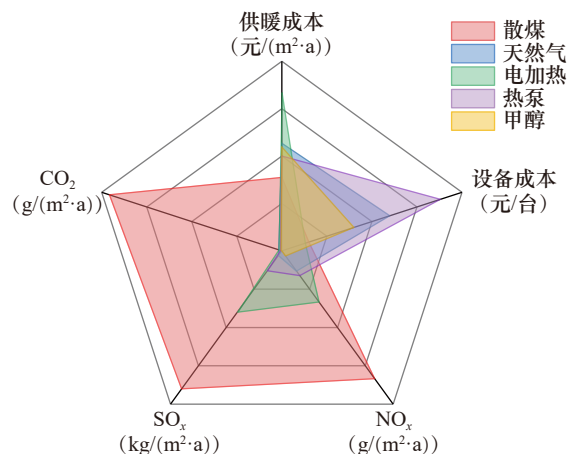


图6 民用供暖燃料对比

现尤为突出： NO_x 排放浓度低于 41.07 mg/m^3 ，CO排放浓度低于 12.5 mg/m^3 ，且无 SO_x 及颗粒物排放。相较于燃煤和天然气供暖，甲醇供暖是兼具经济性和环境友好性的清洁供暖技术，为农业大棚场景中替代散煤提供了经济可行的解决方案。

4. 重要的化工原料和氢能载体

甲醇是一种重要的化工原料，用于生产烯烃、芳烃、甲醛等有机化工产品，中短期甲醇与石化基地的石脑油耦合实现降本增效，远期可大幅替代石油合成有机化工品，推动石化行业迈向碳中和绿色化转型。在氢能领域，甲醇（ CH_3OH ）分子结构中

含有4个氢原子，其氢质量比例高达12.5%，体积氢密度为 $99 \text{ gH}_2/\text{L}$ ，显著高于高压氢气（70 MPa， $14\sim 40 \text{ gH}_2/\text{L}$ ）和液态氢（约 $71 \text{ g H}_2/\text{L}$ ）^[18]。如表2所示，通过对比输氢方式的储运条件、能耗、输氢成本等参数，甲醇作为一种液态储氢体，凭借其高氢含量（12.5%）、较低的输氢能耗以及经济的输氢成本，展现出显著优势^[19]。20~25 MPa、49 t运载量的钢制高压管束车单次运输压缩氢气约为300~500 kg，且因需要保持残余压力到站可卸载量约为250 kg。相比之下，同为49 t的燃料罐车可运输约37.5 t甲醇，按甲醇制氢折算相当于约5.37 t氢气。以广东地

表1 农业大棚供暖比较

| 项目 | 燃煤 | 生物质 | 甲醇 | 电加热 | 地源热泵 |
|---|-------|---------|---------|-------------------------------------|------|
| 能源类型 | 煤炭、电能 | 生物质、电能 | 甲醇、电能 | 电能 | 电能 |
| 燃料消耗/ ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$) | 12.2 | 11.5 | 9.6 | — | — |
| 耗电量/ ($\text{kW}\cdot\text{h}^{-1}$) | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 50 | 10.3 |
| 能源价格 | 1元/kg | 1.2元/kg | 3.3元/kg | 0.54元/ ($\text{kW}\cdot\text{h}$) | |
| 日总能/ ($\text{元}\cdot\text{d}^{-1}$) | 157.2 | 177.6 | 148.8 | 162 | 67.2 |

注：1.测试环境条件：533.34 m^2 的育苗场，棚外温度约 $-6 \text{ }^\circ\text{C}$ ，棚内保持温度 $17\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ；2.日总耗能：该场景仅需晚上的12 h需要供热；3.燃煤、生物质价格为当地零售价。

表2 储氢方式的对比

| 项目 | 气态氢 | | 液态储氢 | | | 固体储氢 | |
|---|--|--|--|---|-------------------------------------|--|--|
| | 氢气 | 高压气氢 | 液氢 | 液氨 | 甲醇 | 物理吸附 | 金属氧化物 |
| 体现形式 | 氢气 | 高压气氢 | 液氢 | 液氨 | 甲醇 | 物理吸附 | 金属氧化物 |
| 运输方式 | 管道掺氢 | 长管拖车 | 槽车 | 槽车/管道 | 槽车/管道 | 货车 | |
| 储运条件 | $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 1~4 MPa | $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 20~70 MPa | $-253 \text{ }^\circ\text{C}$, 0.6 MPa | $-20 \text{ }^\circ\text{C}$, 0.1 MPa | $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 常压 | $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 0.1~4 MPa | $65 \text{ }^\circ\text{C}$, 4~7 MPa |
| 自身密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | 0.089 | 40 | 70.6 | 617 | 792 | 400~600 | >1500 |
| 体积储氢密度/ ($\text{g H}_2\cdot\text{L}^{-1}$) | 0.09~3.2 | 14~40 | 64~71 | 108 | 99 | 50~150 | 50~110 |
| 含氢质量分数/% | | | | 17.7 | 12.5 | 1~3 | 4~7.6 |
| 运载氢气象/kg | | 300~400 | 4000~7000 | >2000 | >2000 | 300~400 | ≤ 1200 |
| 能耗/ ($\text{MJ}\cdot(100 \text{ km}\cdot\text{kg H}_2)^{-1}$) | 1.26 | 10 | 30 | 8 | 7 | 12 | 18 |
| 输氢成本/ ($\text{元}\cdot(100 \text{ km}\cdot\text{kg H}_2)^{-1}$) | 0.4 | 3.2 | 8.5 | 2.5 | 2.2 | 4.0 | 5.5 |
| 经济距离/km | ≥ 500 | ≤ 200 | ≥ 200 | ≥ 200 | ≥ 200 | ≤ 150 | |
| 优势 | 大规模、长距离 运输，能耗低 | 充放氢 速度快 | 纯度高、 运输效率高 | 储氢密度高、 无 CO_2 排放 | 储氢密度高、 安全性高 | 体积储氢 密度大 | 能耗低 |
| 劣势 | 建设成本高、 泄漏风险高、 纯度较低 | 运氢 效率低 | 能耗高 | 生物毒性 | 转化环节长、 对原料的 敏感性高 | 质量储氢密 度低，充放 氢速度慢 | 储存释放 条件苛刻 |
| 研发方向 | 纯氢管道 | IV型、 V型 | 液化技术 | 氢气提纯 | 催化剂的寿命 | 吸附材料的 稳定性 | 热管理系统 |
| 应用情况 | 大规模、长距离运输 | 短距离运输 | 航天 | 航运示范中 | 中长距离运输 | 实验室、示范推进中 | |

区为例，目前佛山地区加氢站加气价格为35元/kg，而工业副产氢气的到站价格约为53元/kg，电解水的理论价格约为33元/kg（电价为0.6元/(kW·h)），而甲醇制氢的理论价格仅为12~15元/kg（不含设备折旧、运维及利润等，甲醇价格取广州港期货甲醇价格范围：2000~2500元/t）。加之易储存运输和成熟的工业基础，使甲醇在解决长距离、大规模输氢难题上成为最佳的氢能载体，有助于沿海地区氢能的推广。

（二）绿色低碳甲醇的优势

1. 液体能源的优势

液体能源在能量密度、运输、储存及加注等方面展现出显著优势，是最佳的能源载体。在能量密度上，能源使用过程中的场景多为严格受限空间，体积能量密度是衡量能源性能的关键指标。液体能源（汽油、甲醇等）的体积能量密度远超气体和电池能源形式。在运输方式上，液体能源在常温常压下即可通过管道及海运实现陆地及海洋大规模、远距离输送。在运输成本上，液体能源的单位热值运输成本最低。在储存方式上，液体能源能在常温常压条件下长期稳定储存在储罐中；超长时储能可达100 h，并可通过扩展储罐容量快速增加。甲醇储罐的能量容量成本约为0.06元/MJ， $2 \times 10^5 \text{ m}^3$

储罐可储存约 $3.2 \times 10^9 \text{ MJ}$ 。此外，在加注效率方面，如表3所示，加注汽油和甲醇的单位时间充能分别为398.7 MJ/min和197.0 MJ/min，远高于其他能源形式的加注效率。因此，充分发挥和利用液体能源优势，将有效解决我国能源调配难题，是实现我国能源体系优化升级的重要路径。

在液体能源领域，甲醇由于单位热值成本低且稳定、本土产能充足、具备通过可再生能源合成潜力、燃烧清洁且使用便利、储运与加注体系可与现有燃油基础设施兼容，一代基础设施可供内燃机汽车、混合动力汽车、燃料电池汽车、船舶、无人机、农业机械等多元化交通装备使用，同时具备绿色化生产前景，是破解中国“能源不可能三角”的理想能源形式。

2. 单位热值价格低

如表4所示^[20,21]，甲醇的单位热值价格（126.22元/MMBtu）在除一次能源外的能源载体中是最低的，分别仅为电力、氢气和汽油价格的79.90%、61.46%和53.09%。

3. 价格长周期稳定

甲醇的价格与原料（煤/天然气）价格联动，随着煤炭及天然气价格上涨而增长^[22-24]。近十年来，甲醇价格介于70.4~140.7元/GJ（1500~2800元/t）区间，其中近4年价格处于125.6~140.7元/GJ（2500~

表3 加注方式的对比

| 加注方式 | 低位热值 | 补给量 | 总能量/MJ | 充能时间/min | 单位时间充能/(MJ·min ⁻¹) |
|--------|---------------|---------|----------|----------|--------------------------------|
| 慢充 | 3.6 MJ/(kW·h) | 60 kW·h | 216.0 | 540 | 0.4 |
| 快充 | 3.6 MJ/(kW·h) | 36 kW·h | 129.6 | 30 | 4.3 |
| 超快充 | 3.6 MJ/(kW·h) | 36 kW·h | 129.6 | 12 | 10.8 |
| 充氢气 | 120 MJ/kg | 5 kg | 600.0 | 4 | 150.0 |
| 充压缩天然气 | 50 MJ/kg | 15 kg | 750.0 | 4 | 187.5 |
| 加甲醇 | 19.9 MJ/kg | 50 L | 788.0 | 4 | 197.0 |
| 加油 | 43.1 MJ/kg | 50 L | 15 984.7 | 4 | 398.7 |

表4 各类能源及能源载体的单位热值价格及碳排放量

| 燃料 | 煤炭 | 生物质 | 天然气 | 液化气 | 甲醇 | 电力 | 柴油 | 氢气 | 汽油 |
|--|------------|----------|-----------------------|----------|------------|---------------|------------|-----------|------------|
| 低位热值 | 24.8 MJ/kg | 16 MJ/kg | 36 MJ/Nm ³ | 46 MJ/kg | 19.9 MJ/kg | 3.6 MJ/(kW·h) | 42.7 MJ/kg | 120 MJ/kg | 43.1 MJ/kg |
| 价格 | 800元/t | 500元/t | 4元/Nm ³ | 5500元/t | 2650元/t | 0.6元/(kW·h) | 8970元/t | 26元/kg | 10 810元/t |
| 单位热/(元·GJ ⁻¹) | 32.26 | 31.25 | 111.11 | 119.57 | 133.17 | 166.67 | 210.07 | 216.67 | 250.81 |
| 值价格/(元·MMBtu ⁻¹) | 30.58 | 29.62 | 105.32 | 113.33 | 126.22 | 157.98 | 199.12 | 205.37 | 237.74 |
| CO ₂ 排放/(g·MJ ⁻¹) | 119.9 | 113.2 | 56.0 | 65.1 | 69 | 172.4 | 78.2 | 0 | 73.1 |

注：MMBtu为百万英制热单位，1 MMBtu=1055 MJ=293.07 kW·h；CO₂排放量仅为燃用阶段；电力的碳排放因子选取2023年全国电力平均CO₂排放因子^[5]。

2800 元/t) 区间。在价格波动性方面, 甲醇的波动幅度显著小于煤炭、天然气及石油。因此, 甲醇的价格稳定性相对较高。

4. 产能

全球传统甲醇产量约为 1.45×10^8 t, 其中我国的产量约为 9×10^7 t。考虑到在建及规划中的煤制甲醇产能超过 3×10^7 t, 绿色甲醇项目超过 5×10^7 t, 因此, 在可见的未来我国甲醇总产能预期将突破 2×10^8 t。此规模可替代约 1×10^8 t 燃油, 相当于减少约 1.6×10^8 t 原油需求, 从而降低我国约 30% 的原油进口量, 显著增加国家能源安全保障。

5. 燃烧清洁

甲醇燃烧清洁, 其燃烧主要产物为 CO_2 和水, 不排放 SO_x 和颗粒物。由于甲醇层流火焰速度 (50 cm/s) 远大于汽油 (28 cm/s), 绝热火焰温度 (1870 °C) 低于汽油 (2000 °C), 且燃烧缸体的温度低, 使得燃用甲醇的 NO_x 排放量极低, 仅为 0.06 mg/km, 远低于无净化汽油 (2.70 mg/km) 和带三元净化汽油 (0.22 mg/km), NO_x 减排幅度达 70% 以上^[25-27]。

此外, 由于甲醇含氧量高达 50%, 燃烧过程中 CO 的排放仅为 0.2 mg/km, 远小于无净化汽油 (5.32 mg/km) 和带三元净化汽油 (0.86 mg/km), CO 减排幅度达 75%。另外, 甲醇发动机和柴油发动机相比, 颗粒物下降 98%, CO 下降 88%, NO_x 减少 82%, 因甲醇不含硫, SO_x 减少 100%, NO_x 、发动机排气中未燃尽燃料和部分燃烧产物的总和及 CO 排放水平可达国 VI 限值的 10% 以下, 具备国 VII 通过潜力、近零排放。综合而言, 甲醇燃料的污染物排放显著低于传统汽油和柴油。

五、绿色低碳甲醇制备的发展瓶颈

(一) 间歇式风光稳定制氢和长时储氢

目前绿色低碳甲醇制备在能源供需、技术、经济性、系统整合等 4 个层面上存在发展瓶颈。在能源供需层面上, 风电、光伏年有效发电时长仅占全年的 11%~25%, 与化工装置年运行超 8000 h 的需求存在巨大差距, 这直接导致单纯依靠风光直供的制氢系统利用率低、设备闲置成本高。在技术层面, 亟需攻克适应宽幅快速功率波动的电解槽及下游工艺的耐冲击性与长效稳定性, 同时“制氢-合

成-储能”多环节的动态耦合与智能协同控制技术尚不成熟, 系统整体运行效率与安全性面临考验。在经济性层面, 为平抑间歇性、保障连续生产, 需配置大规模储能(电、氢、热)或备用电源, 这显著增加了系统初始投资与运维复杂度, 使当前绿氢制甲醇的成本竞争力薄弱。在系统整合层面, 实现风光资源、电网条件、储能状态、生产负荷的分钟级至小时级精准预测与优化匹配, 并建立多目标协同调控体系, 仍是亟待突破的工程与科学难题。因此, 唯有在这些瓶颈环节取得实质性进展, 才能真正确保一体化系统在适配性、经济性与安全性上达到商业化推广要求。

(二) 水资源开发利用和沙化地改良

在规划我国新疆、内蒙古等西北沙化地区绿氢基绿色低碳甲醇产业的布局时, 一个根本性的发展瓶颈日益凸显: 水资源极端短缺与生态承载力脆弱构成了双重刚性约束。该区域年降水量稀少, 蒸发量巨大, 水资源总量先天不足且时空分布不均, 同时沙化土地基质松散、保水能力极差, 生态环境处于敏感平衡状态。这导致了两大基础需求之间出现难以调和的矛盾: 一方面, 规模电解水制氢作为产业链的核心环节, 本身属于高耗水过程(每生产 1 kg 绿氢约需消耗 10~12 L 高纯度水); 另一方面, 要实现区域的可持续发展, 对沙化土地进行生态修复与改良又离不开持续稳定的生态用水保障。光伏发电设施在该类地区的规模化建设, 可对局地水资源平衡产生积极影响。光伏板不仅通过遮蔽作用有效降低地表水分蒸发, 其特有的“板下微气候”还能形成露水凝结, 为耐旱植被提供少量的水分补给, 从而在一定程度上缓解生态修复的用水压力, 并为干旱区“光伏+生态治理”模式创造了协同条件。因此, 如何在有限且敏感的水资源条件下, 统筹协调高耗水产业扩张、生态修复需求以及自然水文循环保护三者之间的关系, 成为贯穿该区域能源绿色转型和生态安全建设全过程的深层矛盾与核心挑战。

六、绿色低碳甲醇的发展模式

(一) 绿色低碳甲醇是可再生的长时储能载体

通过风光电解水制绿氢/绿氧, 将不稳定、间

歇性的可再生能源转化为稳定的化学能。同时，利用煤或生物质气化提供碳源，经合成气调控后合成甲醇，实现氢、碳协同转化，其中甲醇中62.5%的能量来源于风光资源。相较于传统的电化学储能，甲醇液体易储存、性质稳定，具备长周期、跨季节和大规模储存能力，是平衡区域电网波动、提升可再生能源消纳水平的理想选择。同时结合我国西高东低的地理特征，西部生产的甲醇可以通过管线借助势能差以低成本方式运输到东部及沿海城市。在该过程中，碳元素不仅作为甲醇的结构组成成分，更是能源载体的重要角色，实现了风光电力向高密度液体燃料的高效转化与储存。这一模式兼顾了能源安全、低碳发展与可再生能源的规模化应用，为构建多能互补的能源系统和实现能源系统的柔性调节提供了重要路径。

（二）“西醇东用”：可再生能源的液体输送

相比于天然气，甲醇在管线输送方面具有显著优势。首先，甲醇的管线输送线损少，且其体积能量密度远高于天然气。在常温常压条件下，天然气的体积能量密度为 $10 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ，而甲醇的体积能量密度高达 $4300 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ，是天然气的430倍。此外，甲醇的凝固点为 $-94.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ，表明甲醇能以液体形式全年通过管道，无需保温层长距离稳定运输。在输送能力上，一条DN1000 mm的中压甲醇输送管道（压力 $\leq 8 \text{ MPa}$ ，输送线速度 2.5 m/s ）每年可输送约 $4.5 \times 10^7 \text{ t}$ 甲醇（管道年工作天数约300天，能量为 $8.04 \times 10^{11} \text{ MJ/a}$ ），输送能量相当于2.66条 $\pm 1100 \text{ kV}$ 高压直流输电通道的年输送电量（单条通道年输电电量为 $3.0 \times 10^{11} \text{ MJ/a}$ ，线损约5.6%），长距离（3900 km）甲醇输送管道直接投资成本约为860亿元。而建设1条3900 km的 ± 1100 特高压直流输电通道投资成本约为900亿元。以假设建设“疆醇送粤”管线为例，采用长距离输运管道输送新疆煤制甲醇至广东，成本为1980元/t MeOH（含管道运输费），低于当前广东地区传统甲醇成本（2395元/t MeOH），且单位热值成本显著低于柴油。从中远期来看，输送绿色低碳甲醇市场竞争力将更强；远期，随着 CO_2 捕集成本和绿电成本的下降，以及碳税政策的逐步实施，输送绿色甲醇将具有可行性（上述比较主要用于体现能量输送量级上的直观差异，并不构成对两种方案在全链路效率或综合

经济性上的严格比较）。

在绿色低碳发展要求越来越高的背景下，能源多元化是保障国家安全的重要举措，基于我国西气东输管线已经建成，未来建设“西醇东送绿色大动脉”工程和发展“绿色低碳甲醇全产业链创新”的必要性和战略性更加凸显，可行性基本具备。能上网绿电优先上网，直接上网是最经济高效的能源使用路径；智能电网与绿色低碳管网的有机结合，可逐步将当前的煤炭/石油经济转变为以可再生能源为主导的绿色电力和甲醇经济，进而提高非稳定的风光资源在国家能源中的占比，实现“风光”资源与煤炭资源的全生命周期高价值转化，构建“西醇东用”绿色大动脉。

（三）绿色低碳甲醇实现海陆空交通的绿色化

甲醇作为清洁、高效的液态风光能源储存载体，其重要地位日益凸显。随着甲醇加注设备的逐步产业化，甲醇正在成为推动海陆空交通装备绿色转型的重要抓手（见图7）。在陆地交通领域，甲醇汽车、甲醇增程式电动车已在多个省份实现规模化示范。依托完善的加注基础设施，甲醇车辆在城市物流、长途运输、城乡通勤等场景具备良好的市场基础和发展前景。甲醇制氢技术可有效解决氢能的长距离运输难题，以缓解东部用氢成本高、用氢难的挑战。在船舶领域，甲醇动力凭借其低污染、易存储、适配现有港口设施等优势，已成为国际航运

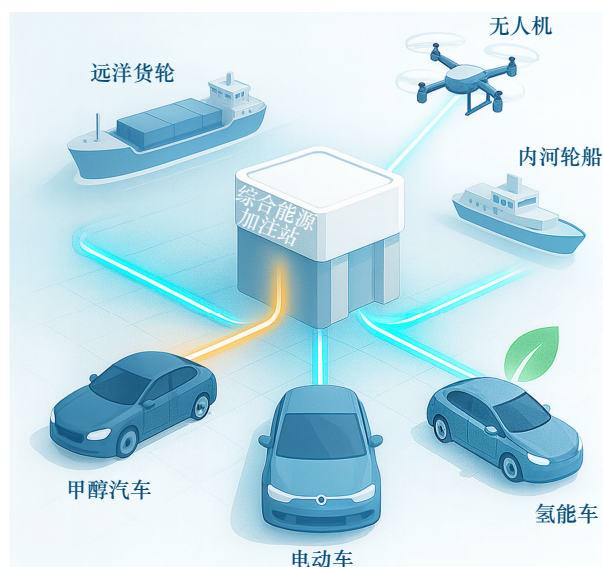


图7 甲醇交通能源体系

业绿色转型的重要技术路线。目前,沿海、内河船舶甲醇替代已进入实质性应用阶段。更值得关注的是,在航空领域,甲醇制氢耦合燃料电池技术与甲醇内燃机增程式技术正加快向无人机、轻型航空器等细分领域拓展,提升低空经济载具的载重能力及续航能力,为打造万亿级低空经济与绿色航空发展开辟了新的能源路径。整体来看,以甲醇加注系统设备为核心的“绿色交通”布局,已实现从示范应用向产业化、规模化跨越,覆盖城市出行、跨区域运输、内河航运、无人机集群等多元应用场景,展现出清洁能源在交通系统广泛替代与综合应用的现实路径。

(四) 绿色低碳甲醇助力农业农村的清洁化利用

当前,农村地区在取暖、炊事、大棚供暖、谷物干燥、禽畜育苗等方面仍大量使用散煤,同时柴油仍被广泛应用于农机、灌溉设备、渔船、运输车辆和农用热力等,能源利用效率低,污染物排放高,已成为制约乡村生态振兴与绿色发展的突出短板。尽管近年来国家在北方地区持续推动蓝天工程,但由于农业用能存在便捷性和低价性的双重需求,农业农村的散煤和柴油的替代工作进程缓慢。随着甲醇燃料民用供应体系和应用装备的日趋成熟,甲醇清洁能源在农村取暖、灶具、热水供应及农业热力利用等方面的推广取得了显著进展,已在多个省份形成典型示范,有效降低了农村散煤使用量,改善了区域空气质量。在农业生产环节,甲醇替代柴油动力的农用机械、灌溉泵、运输车辆等装备的研发与应用正加速推进,部分地区已开展甲醇农机田间试点,推动农业生产过程更加清洁高效。与此同时,甲醇在渔业船舶、乡村物流、应急电源等场景的应用也逐步拓展,进一步丰富了农村能源供应结构。总体来看,甲醇燃料在农业农村的推广应用,不仅有效缓解了能源安全与环境污染矛盾,更助力乡村能源系统向清洁、高效、多元化方向发展。这一实践为实现农村污染减排、能源转型与绿色振兴提供了重要支撑路径。

(五) 甲醇助力工业用能清洁化

从工业用能的视角审视,甲醇的工业化利用正日益成为缓解天然气供应紧张、推动工业能源结构多元化、促进碳减排的重要支撑路径。当前,受资

源分布不均、价格波动与供应约束影响,天然气等高品质能源在部分区域出现供应紧张,导致污染排放较高的低价能源使用增加,制约了重点产业链的平稳运行与清洁化发展。在高耗能行业,甲醇替代部分天然气作为燃料或原料,已在陶瓷、玻璃、冶金、建材等领域展开应用示范,切实缓解了天然气紧缺引发的供需矛盾;同时,得益于其良好的燃烧特性,可提升产品品质。甲醇在分布式能源、工业锅炉、热电联产等用能环节的推广,提升了能源系统的清洁化、灵活性与经济性。随着绿色低碳甲醇、可再生绿色甲醇等新型甲醇路径的发展,甲醇在工业领域的应用潜力持续拓展,为降低碳排放总量,推动高耗能行业绿色低碳转型提供了有力支撑。可以预见,甲醇的大规模工业化利用,将成为保障能源安全、优化能源结构、促进工业清洁高效发展及实现碳中和的重要战略选择。

七、绿色低碳甲醇的发展建议

(一) 促进绿色低碳甲醇发展,探索能源资源开发新模式

能上网绿电优先上网,直接上网是最经济高效的能源使用路径;但随着风光资源基础设施的大规模建设,产生的电力可能无法全部上网。在现有煤化工基础上,依托绿色低碳甲醇路径实施改造升级,系统引入风电、光伏、绿氢、土地荒漠化治理、并与甲醇合成深度耦合,推动煤化工产业从传统高碳排放模式向清洁、高效、增汇、灵活多联产业体系转型。具体而言,可基于现有煤制甲醇、煤制合成气等基础设施,通过煤炭清洁高效利用新技术(如微矿分离技术)对劣质煤进行预处理,获得清洁固体燃料,用于现有煤气化工厂进行气化,并耦合绿电产生的绿氢及绿氧,省去传统工艺中高能耗、高碳排的空分装置及水煤气变化装置;微矿分离过程副产的矿物质,可制成微矿有机肥、微矿复合肥及土壤改良剂,可治理板结土地、沙土地及盐碱地,使更多的贫瘠土壤恢复耕种能力。打造集甲醇生产、土地治理、长时储能与灵活调峰功能于一体的综合系统。优先支持在新能源大基地周边及煤炭资源富集区域布局绿色低碳甲醇项目,促进煤电、煤化工、现代农业与新能源产业协同发展,形成“绿电-碳源利用-土地治理-甲醇合成-能源

转化”闭环体系，既能有效缓解大规模风光弃电问题，又能增强和提升煤化工产业链的韧性与绿色附加值。通过政策引导、标准制定与示范工程建设，推动绿色低碳甲醇在能源大基地实现规模化、系统化布局，充分发挥其在长时储能、跨季节调节、清洁燃料供应、土地治理等方面的综合优势，助力我国能源结构优化与煤化工绿色高端转型。

（二）加快推进“西醇东用”绿色低碳甲醇管网互联互通，构建跨区域能源优化配置新格局

加快推进绿色低碳甲醇管网的互联互通与储运体系建设，着力建设“西醇东用”战略通道，打造贯通西部资源富集区与东部经济发达区的绿色大动脉，构建服务全国的绿色低碳甲醇长时储能与灵活调节体系。通过完善甲醇输送、储存及调峰基础设施，有效对接西部地区丰富的可再生能源、煤炭资源与东南沿海地区庞大的能源消费需求，形成跨区域、多节点、灵活高效的甲醇能源配置网络。统筹沿线地区资源优势，系统布局甲醇生产、储醇与用醇基地，协同发展风光制氢、碳源协同与绿色低碳甲醇合成等产业环节，充分释放沿线新能源开发、化工升级与新型储能产业的发展潜力，支持其在交通、工业、分布式能源等领域的深度应用，提升甲醇在能源保障体系中的战略地位。依托“西醇东用”绿色大动脉建设，促进东西部资源要素高效流动与产业深度协同，助力实现全国能源结构优化、区域协调发展与绿色低碳转型战略目标。

（三）甲醇经济推广应循序渐进，遵循量变促质变的良性发展路径

甲醇经济的推广应坚持循序渐进、分阶段推进的路径，避免片面追求“绿色标签”而脱离现实应用基础。甲醇在交通、分布式能源、农业农村及工业替代等领域已展现出显著的经济性和环保性，具备充足的落地条件。如果严格按当前的国际绿色甲醇标准执行，制造成本太高，国内无法大规模推广应用。因此，不宜过度强调绿色甲醇标准规定的生产端“绿色度”门槛，建议建立适合中国国情的绿色低碳甲醇国家标准，即只要甲醇制备需要的氢气和氧气是源于绿电制备，碳源为煤尤其是劣质煤（分离出的矿物质可以在太阳能板底下治理沙土地），生产的甲醇就比煤制甲醇减碳约72%（未将协同的

生态碳汇计入）。应制定相应的绿色低碳甲醇国家标准及减碳溢价，根据其减碳程度享受碳税优惠。同时应优先聚焦于甲醇应用技术成熟、加注体系完善、政策支持明确的场景，大力推动甲醇能源化、规模化应用。通过激活下游市场需求，驱动上游低碳技术迭代与升级，逐步形成量变引领质变的良性发展格局。任何能源形态的绿色低碳转型，都需以稳定的市场需求与产业规模为前提，唯有当甲醇形成实际消费量，“绿色低碳甲醇”“可再生绿色甲醇”等路径才具备真正的市场化动力和技术投资回报。因此，现阶段应聚焦甲醇燃料车、船舶、无人机、发电机、锅炉及农业用能等落地可行强的场景，着力完善政策与标准体系，优化支持措施，推进示范应用，率先激活甲醇消费市场，夯实产业基础。待甲醇能源消费形成规模化效应、市场认可度显著提升后，根据碳税的价格再逐步提高甲醇的绿色比例及全生命周期碳减排体系建设，最终实现甲醇经济清洁低碳与高质量发展的双重目标。

（四）针对甲醇能源用途建立独立的管理体系，避免“一刀切”的危险化学品管控制约其推广

从能源政策与安全管理的角度来看，绿色低碳甲醇应以新能源属性进行归类与管控，而非简单纳入危险化学品框架加以限制。我国现行《危险化学品目录（2015版）》将甲醇列为危险化学品，其依据主要源于《联合国危险货物运输建议书》中3类易燃液体的分类。甲醇的确具备易燃（自燃点：464℃）、低闪点（闪点：11℃）和低沸点（沸点：64.7℃）等特征。参照《化学品分类与危险性公示通则》（GB 13690—2009），闪点≤60℃的液体即属易燃液体，甲醇远低于该标准限值。同时，甲醇属低毒性物质，但具有显著的急性毒理效应。根据《化学品分类与标签规范 第18部分：急性毒性》（GB 30000.18—2013）标准，甲醇在口服、吸入和经皮途径上均被归类为急性毒性类别3物质。尤其在化工生产、溶剂应用和原料合成等工业环境中，若缺乏规范管理确实存在较高安全隐患。因此，基于事故防范与公共安全考量，我国依据《危险化学品安全管理条例》《危险货物道路运输规则》等法规，对甲醇实施严格的储运、使用、监管。

然而，上述界定和管控逻辑本质上是基于甲醇“化工原料”属性建立的。随着甲醇在能源领域的

广泛应用，其作为能源载体属性愈发突出，应用场景逐步从工业集中区拓展至城乡交通、农业农村、船舶运输等公共领域。其储运规模、使用模式与传统危险化学品截然不同。若继续“一刀切”式沿用化工原料的危化品管理模式，将严重制约甲醇作为清洁能源的推广效率，阻碍我国能源结构优化与碳减排目标的实现。实际上，国际上已普遍将能源甲醇参照液化石油气、天然气等成熟能源产品进行独立管理，既能保障安全，又可兼顾灵活发展。因此，建议我国依据甲醇的能源属性，清晰区分“化工甲醇”与“能源甲醇”。针对后者，应构建覆盖“生产-质量控制-应用-监管”全链条的专属管理体系，制定契合实际能源使用场景的安全技术标准与管理体系，在保障安全的前提下，加快推进绿色低碳甲醇作为新能源的规模化发展。

(五) 推动甲醇加注体系标准化、民用化建设，提升安全性与交易透明度

在民用推广过程中，推动覆盖甲醇加注体系的储存、运输、配送和使用的民用化标准体系建设，是实现甲醇能源规模化推广的关键。目前，甲醇作为化工原料，其工业储运体系（如涵盖密闭储罐、专用槽车、管道输送、港口码头设施等）已具备高度成熟的技术水平与安全管理经验，整体安全性可控。然而，随着甲醇在民用领域的加速应用，其加注体系在便捷性、安全性与社会公共属性方面面临新的需求。借鉴我国液化石油气民用化经验，甲醇的民用化发展需加快小型储罐、便携加注装置、车用/家用接口等标准制定，更应将其纳入独立的能源产品管理体系，与传统危险化学品监管区分，推动全链条规范化发展。

相比于其他燃料，甲醇作为民用燃料具备独特优势。甲醇的密度与热值高度相关，通过快速密度检测即可监控热值，提高了燃料交易的透明度与公正性，可有效避免煤炭掺杂、天然气掺 CO_2 等造假行为，有效保障民众用能真实、可靠、经济。同时，需借鉴液化石油气推广经验，构建甲醇能源独立管理体系并强化全流程监管与社会感知。例如，通过加入特定的安全示踪剂（臭味剂、着色剂、苦剂等），提升甲醇泄漏、误食的可识别性，以保障使用安全。综上，推动甲醇加注体系的标准化、模块化与民用化，是保障甲醇能源健康发展、破除

“危险化学品”认知壁垒、促进其在城乡多元场景广泛应用的基础。甲醇民用能源体系有望成为推动清洁能源下乡、保障能源公平、助力乡村绿色发展的重要组成部分。

(六) 甲醇碳排放应采用能量法核算，体现其能源属性与减排价值

从碳排放核算与能源生命周期研究的角度来看，甲醇作为典型的液体能源载体，其碳排放测算过程亟需引入“能量法”体系，避免简单以质量法（即“一刀切”的产品单位质量碳强度）来衡量，导致评价偏差。甲醇的核心价值在于其作为二次能源、清洁燃料和能源载体的战略地位。

因此，科学设定甲醇制造过程中的化石能源基准线，是构建公平、动态且有激励效应的碳排放核算框架的必要前提。基于能量法，甲醇生产过程的碳排放应依据其最终能源用途和能源输入结构进行整体核算，允许并鼓励企业通过工艺节能、能效提升、资源梯级利用等措施降低甲醇单位能量产出的碳强度。同时，核算体系应充分认可并支持在甲醇生产中整合风能、光伏、水电等清洁能源和增汇的路径，驱动甲醇产业链绿色低碳转型。相较之下，单纯采用质量法设定统一的产品碳强度标准，忽视了甲醇生产过程中能源结构优化和技术进步的空间，不利于形成差异化、导向性强的政策工具。甲醇作为能量载体的本质属性，要求碳排放核算体系更充分体现其能源来源特征，强化与能源体系协同，既能保障碳减排目标的实现，又促进甲醇的低碳应用。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: December 16, 2025; **Revised date:** January 29, 2026

Corresponding author: Liu ke is a chair professor from the School of Innovation and Entrepreneurship, Southern University of Science and Technology. His major research field is clean energy and the methanol economy. E-mail: liuk@sustech.edu.cn

Funding project: National Key R&D Program of China (2024YFC2909802); Guangdong Innovative and Entrepreneurial Research Team Program (2016ZT06N532)

参考文献

- [1] Pierre F, Michael O, Matthew W, et al. Global carbon budget 2024 [J]. *Earth System Science Data*, 2025, 17: 965–1039.

- [2] 谢克昌. 新型能源体系发展思考与建议 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(4): 1–8.
Xie K C. Strategic thinking and suggestions on new energy system [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(4): 1–8.
- [3] 王国荣, 周莉, 周守为, 等. 多种能源融合发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(4): 84–95.
Wang G R, Zhou L, Zhou S W, et al. Multi-energy integrated development strategy [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(4): 84–95.
- [4] 吴昌宁, 翁力, 李俊国, 等. 微矿分离: 煤炭清洁化与土壤改良的新契机 [J]. 科学通报, 2021, 66(25): 3352–3364.
Wu C N, Weng L, Li J G, et al. A novel mineral separation process: New opportunity for clean coal utilization and soil remediation [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(25): 3352–3364.
- [5] Verhelst S, Turner J W, Sileghem L, et al. Methanol as a fuel for internal combustion engines [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2019, 70: 43–88.
- [6] Karvounis P, Theotokatos G, Vlaskos I, et al. Methanol combustion characteristics in compression ignition engines: A critical review [J]. Energies, 2023, 16(24): 8069.
- [7] 吉利控股集团. 2023 可持续发展报告 [R]. 杭州: 吉利控股集团, 2024.
Geely Holding Group. 2023 sustainability report [R]. Hangzhou: Geely Holding Group, 2024.
- [8] 贵阳市人民政府办公厅. 贵阳市甲醇汽车推广应用实施方案 [R]. 贵阳: 贵阳市人民政府办公厅, 2020.
General Office of the Guiyang Municipal People's Government. Implementation plan for the promotion and application of methanol vehicles in Guiyang [R]. Guiyang: General Office of the Guiyang Municipal People's Government, 2020.
- [9] 曹建喜, 董松祥, 商红岩, 等. 甲醇柴油的研究进展 [J]. 现代化工, 2010, 30(6): 41–45.
Cao J X, Dong S X, Shang H Y, et al. Advances in methanol-diesel [J]. Modern Chemical Industry, 2010, 30(6): 41–45.
- [10] Stephen R. An introduction to combustion: Concepts and applications [M]. Singapore: McGraw-Hill, 2000.
- [11] Law C K. Combustion Physics [M]. New York: Cambridge University Press, 2006.
- [12] Glassman I, Yetter R A, Glumac N G. Combustion [M]. San Diego: Academic Press, 2014.
- [13] Zhu J L, Wang Z, Li R N, et al. Experimental study and prediction model of combustion stability and combustion mode variation of burning methanol/biodiesel blends for diesel engines [J]. Fuel, 2023, 335: 127038.
- [14] Chen X Y, Long W Q, Wang Y, et al. Experimental investigation on enhanced combustion of methanol/heavy fuel oil by droplet puffing at elevated temperatures [J]. Scientific Reports, 2024, 14: 14525.
- [15] Liang K, Stone R. Laminar burning velocity measurement of hydrous methanol at elevated temperatures and pressures [J]. Fuel, 2017, 204: 206–213.
- [16] Liu J, Zhao J, Zhu Q, et al. Methanol-based fuel boiler: Design, process, emission, energy consumption, and techno-economic analysis [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 54: 103885.
- [17] Huo D, Du Y P, Wang H Y, et al. Comprehensive analysis of rural heating by methanol heating stove: Economy, emissions, and energy consumption [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 155: 387–400.
- [18] Larmi M, Wojcieszek M, Santasalo-Aarnio A, et al. Methanol as a hydrogen carrier [C] // Helmut Eichlseder. Nachhaltigkeit in mobilität, transport und energieerzeugung. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, 2021: 347–357.
- [19] 刘雪, 王力鹏, 李璐伶, 等. Cu 基和 Pt 基甲醇水蒸气重整制氢催化剂研究进展 [J]. 物理化学学报, 2025, 41(5): 80–108.
Liu X, Wang L P, Li L L, et al. Research on Cu-based and Pt-based catalysts for hydrogen production through methanol steam reforming [J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2025, 41(5): 80–108.
- [20] 生态环境部, 国家统计局, 国家能源局. 关于发布 2023 年电力碳足迹因子数据的公告 [R]. 北京: 生态环境部办公厅, 2025.
Ministry of Ecology and Environment, National Bureau of Statistics, and National Energy Administration. Announcement on the release of 2023 carbon footprint emission factors for electricity [R]. Beijing: General Office of the Ministry of Ecology and Environment, 2025.
- [21] International Energy Agency (IEA). Oil 2023 [R]. Paris: IEA, 2023.
- [22] International Energy Agency (IEA). Coal 2023 [R]. Paris: IEA, 2023.
- [23] U. S. Energy Information Administration (EIA). Natural gas annual [R]. Washington DC: EIA, 2023.
- [24] Zhang H W, Shi X P, Cheong T S, et al. Convergence of carbon emissions at the household level in China: A distribution dynamics approach [J]. Energy Economics, 2020, 92: 104956.
- [25] Tian Z, Wang Y, Zhen X D, et al. The effect of methanol production and application in internal combustion engines on emissions in the context of carbon neutrality: A review [J]. Fuel, 2022, 320: 123902.
- [26] Zhou F, Yu J, Wu C H, et al. The application prospect and challenge of the alternative methanol fuel in the internal combustion engine [J]. Science of the Total Environment, 2024, 913: 169708.
- [27] Schröder J, Müller-Langer F, Aakko-Saksa P, et al. Methanol as motor fuel: Summary report [R]. Wieselburg: Technology Collaboration Programme on Advanced Motor Fuels, 2020.