



参考表 1 中各燃料的单位质量热值, 计算各燃料的单位热值价格, 结果如图 2。

表 1 典型燃料的单位质量热值 (单位: MJ/kg)

柴油	液化天然气	甲醇	液氨
42.7	54.8	22.7	18.6

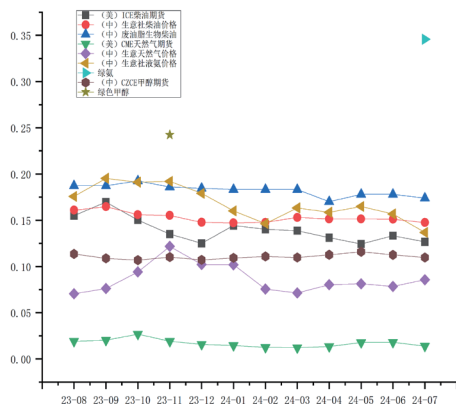


图 2 典型燃料 2023 年 8 月至 2024 年 7 月的热值价格趋势  
(单位: 元/MJ)

柴油因其高热值以及在常温下呈液态的特点，在储存和运输方面较氨气和天然气更为便捷，因此在市场上享有较高的热值价格比。生物柴油作为环保替代品，可以直接用于现有的柴油发动机而无需重大改动，并且与其它绿色能源相比具有成本优势。2021 年，全球柴油消费量为 2693.6 万桶 / 天，而生物柴油消费量为 90 万桶 / 天，占总柴油消费量的 3.2%。尽管生物柴油产量受限于生物质原料供应，但它仍是当前一种优秀的绿色燃料选择。然而，氢制绿氨和氢制绿色甲醇因能够大规模生产，成为更具潜力的大规模绿色燃料选项。

天然气拥有较低的热值价格比，特别是在像美国这样的天然气丰富地区。从减少碳排放的角度来看，与现有的船用石油燃料相比，使用液化天然气（LNG）作为船舶燃料可以在整个船舶生命周期内实现高达 14% 至 21% 的温室气体减排。根据欧洲的 FuelEU Maritime 计划，船用燃料的温室气体（GHG）强度将在 2020 年的基准值（91.16 克二氧化碳每兆焦耳）的基础上逐步降低：2025 年降低 2%，2030 年降低 6%，2035 年降低 14.5%，2040 年降低 31%，2045 年降低 62%，并在 2050 年达到降低 80% 的目标。因此，在 2035 年之前，LNG 燃料在欧洲的船用燃料市场上具有显著的竞争优势。

拥有绿色溢价的绿氨、绿醇是美国天然气同期热值价格的 12 倍和 24 倍，是中国天然气同期热值价格的 2 倍和 4 倍，绿氨相对绿醇，在作为燃料使用时更

不经济。目前，这两种绿色燃料都需要降低成本以提高市场接受度。

## 2 绿氨经济性分析

我国合成氨原料技术路线与国际不同。国际上合成氨以天然气为主，除了短期内的气价飙升带给绿氨发展机会，碳价则是绿氨产业的主要推动力量。相比之下，我国当前以煤为主的灰氨已经发展成熟，工艺技术迭代至较高水平，原料国内自主保障能力较强，当前无碳价影响的情况下，经济性主要取决于煤价。

绿氨由电解水制取的绿氢与空分装置捕获的氮气经合成工艺而得，绿氨的成本主要取决于绿氢的成本，而绿氢的主要成本又取决于绿电。

绿氨成本测算以哈伯法为基础,假定项目装置规模<sup>[2]</sup>: 8.4 万 Nm<sup>3</sup>/h 电解水、2.5 万 Nm<sup>3</sup>/h 空气分离、4.2 万 m<sup>3</sup> 氢气储罐、40t/h 合成氨; 产品产品: 合成氨产量 28 万 t/a, 氧气产量 3.4 亿 m<sup>3</sup>/a, 蒸汽 20 万 t/a; 未考虑副产品氧气收益。每吨绿氨的非电成本约为 873 元, 包含水、催化剂、试剂、工资、修理费、管理费、折旧、摊销、利息等。参考化工产品的增值税 13%, 对比不同电价下的绿氨含税成本结果如图 3。

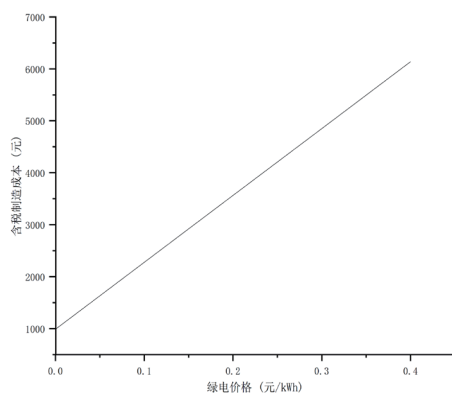


图 3 绿氨价格随绿电价格变化

当前光伏电力的度电成本已降至 0.18 元 / kWh，而陆上风电的成本为 0.19 元 / kWh。以 0.185 元 / kWh 的绿电成本计算，自备绿色电力供应下生产的绿氨成本大约为 3370 元 / 吨，其中约 70% 的成本与绿电相关。

根据当前的市场行情,无烟煤的价格为 1173.5 元/吨,相应的灰氨生产成本为 2541 元/吨。为了使绿氨的成本与当前灰氨成本相匹配,绿电成本需要进一步降低到 0.12 元/kWh,或者按照  $4.190\text{kgCO}_2/\text{kgNH}_3$  的碳排放数据计算<sup>[3]</sup>,碳价需达到 198 元/吨。

### 3 绿色甲醇经济性分析

国内外甲醇生产工艺存在差异，这主要由各自的资源禀赋决定。中国因为煤炭资源丰富，甲醇生产主

要依赖煤制甲醇，此外还包括天然气和焦炉煤气为原料的方法。相比之下，国际市场由于天然气资源充足，几乎所有的甲醇生产都采用天然气作为原料。这一生产原料情况和氨相似，国内灰色甲醇的生产成本与煤价相关。

绿色甲醇含有碳元素，其生产依赖可再生碳源。2021年，欧盟发布了全球首个绿色甲醇认证标准，规定可再生二氧化碳必须来源于生物质或直接空气捕获。由于直接空气捕获二氧化碳成本高昂，采用生物质原料制备甲醇成为一种经济选择。具体途径包括利用生物质气化或重整产生的合成气，以及结合绿氢生产电甲醇。本分析专注于使用可再生二氧化碳与绿氢制备绿色甲醇的技术路径。在这种方法中，绿色甲醇的成本主要受到绿电价格和可再生二氧化碳来源的影响。

以年产10万t的绿色甲醇项目为对象<sup>[4]</sup>，原料气CO<sub>2</sub>的单程转化率为30%，甲醇选择性为80%，年产10万t甲醇理论上需消耗H<sub>2</sub>1.875万t、CO<sub>2</sub>13.750万t，但因存在副反应，实际消耗的H<sub>2</sub>约1.910万t、CO<sub>2</sub>14.600万t，制氢电耗5.47kWh/m<sup>3</sup>。每吨绿氨的非电成本约为490元，包含催化剂、除盐水、循环水、仪用空气、氮气、工资、维修、折旧、管理等。参考化工产品的增值税13%，对比不同电价及不同二氧化碳价格下的绿色甲醇含税成本及不同煤（无烟煤）价下的灰色甲醇含税成本，结果如图4。

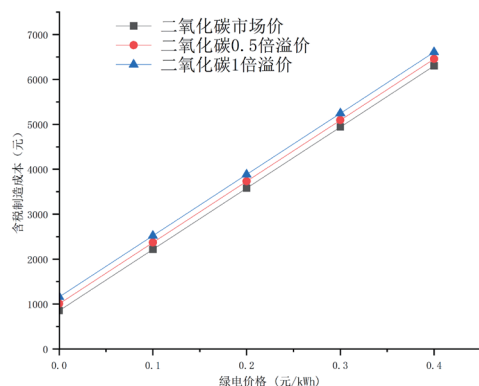


图4 绿色甲醇价格随绿电价格变化

当前光伏电力的度电成本已降至0.18元/kWh，而陆上风电的成本为0.19元/kWh。以0.185元/kWh的绿电成本计算，绿色二氧化碳315元/吨（1.5倍市场价），自备绿色电力供应下生产的绿色甲醇成本大约为3526元/吨，其中约71.5%的成本与绿电相关，绿色二氧化碳成本占比13%。

根据当前市场情况，无烟煤的价格为1173.5元/吨，这导致灰色甲醇的生产成本上升至3605元/吨，这一成本水平与绿色甲醇相当。尽管煤制甲醇过程中

还会产生硫磺、硫酸铵、焦油和粗苯等副产品（成本测算暂未考虑其收益），但由于煤价持续高位运行，煤制甲醇企业目前仍普遍处于亏损状态。目前甲醇现货的市场价格约为2500元/吨，为了使绿色甲醇的成本与当前灰色甲醇售价相匹配，绿电成本需要进一步降低到0.11元/kWh，或者按照3.11kg CO<sub>2</sub>/kg CH<sub>3</sub>OH的碳排放数据计算<sup>[5]</sup>，碳价需达到330元/吨。

#### 4 结论

①在绿色燃料中，目前生物柴油具有价格优势，但绿氨、绿色甲醇更适合大规模生产。

②拥有绿色溢价的绿氨、绿醇是美国天然气同期热值价格的12倍和24倍，是中国天然气同期热值价格的2倍和4倍。相比之下，基于当前市场价格，绿氨作为燃料使用时比绿醇更不经济。

③以0.185元/kWh的绿电成本计算，自备绿色电力供应下生产的绿氨成本大约为3370元/吨，其中约70%的成本与绿电相关。为了使绿氨的成本与当前灰氨成本相匹配，绿电成本需要进一步降低到0.12元/kWh，或者碳价需达到198元/吨。

④以0.185元/kWh的绿电成本计算，绿色二氧化碳315元/吨（1.5倍市场价），自备绿色电力供应下生产的绿色甲醇成本大约为3526元/吨，其中约71.5%的成本与绿电相关，绿色二氧化碳成本占比13%。为了使绿色甲醇的成本与当前灰色甲醇售价相匹配，绿电成本需要进一步降低到0.11元/kWh，或者按照3.11kg CO<sub>2</sub>/kg CH<sub>3</sub>OH的碳排放数据计算，碳价需达到330元/吨。

#### 参考文献：

- [1] 苏思元, 顾芷玉. 中国生物柴油市场概述及未来发展前景分析 [J]. 生物化工, 2023, 9(4): 220-222.
- [2] 王明华. 不同应用场景下新能源制氢合成绿氨经济性分析 [J]. 现代化工, 2023, 43(11): 1-49.
- [3] 刘梦华, 黄道, 李爽, 等. 基于全生命周期评价的中国制氨路线碳排放、能源效率研究及展望 [J]. 中国科学: 技术科学, 2024, 54(07): 1329-1346.
- [4] 舒斌, 范茂琳, 熊健. CO<sub>2</sub>加氢制绿色甲醇的成本测算及预测 [J]. 电力科技与环保, 2024, 40(2): 191-197.
- [5] 孟文亮, 李贵贤, 周怀荣, 等. 绿氢重构的粉煤气化煤制甲醇近零碳排放工艺研究 [J]. 化工学报, 2022, 73(04): 1714-1723.
- [6] 郑可昕, 高啸天, 范永春, 等. 支撑绿氢大规模发展的氨、甲醇技术对比及应用发展研究 [J]. 南方能源建设, 2023, 10(03): 63-73.