

现代化工

生物天然气替代化石能源的碳足迹核算与减排潜力分析

杨云峰

浙江思锐电力科技有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i7.8226

[摘要] 文章以生物天然气替代化石能源的碳足迹核算和减排潜力分析为核心，拟定全生命周期碳足迹核算途径，弄清楚核算边界、参数挑选及模型的构建，剖析基于 MDEA 胺洗工艺生产阶段的碳足迹，解读其占比数值、影响因素及与其他工艺的区别点，估量替代不同化石能源的减排数值，审视发电及燃料场景的潜力空间，依据工艺特性阐明减排长处，为生物天然气替代化石能源走低碳发展道路提供依据保障。

[关键词] 生物天然气；化石能源替代；碳足迹核算；MDEA 胺洗工艺；减排潜力

Carbon footprint accounting and emission reduction potential analysis of bio-natural gas replacing fossil energy

Yang Yunfeng

Zhejiang Sirui Electric Power Technology Co., LTD.

[Abstract] This article focuses on the carbon footprint assessment and emission reduction potential of bio-natural gas as a substitute for fossil fuels. It outlines a comprehensive lifecycle carbon footprint accounting approach, clarifying the boundaries of the accounting process, parameter selection, and model construction. The paper analyzes the carbon footprint during the production phase using the MDEA amine washing process, interpreting the proportion, influencing factors, and differences with other processes. It also estimates the emission reduction values when replacing different fossil fuels, examines the potential in power generation and fuel scenarios, and explains the advantages of emission reduction based on the characteristics of the process. This provides a solid foundation for the low-carbon development path of bio-natural gas as a substitute for fossil fuels.

[Key words] biological natural gas; fossil energy substitution; carbon footprint accounting; MDEA amine washing process; emission reduction potential

引言：

由全球能源转型和碳中和目标所驱动，生物天然气作为可再生能源的必要组成，其替代化石能源所呈现的碳减排价值备受留意，依靠高效提纯特性，MDEA 胺洗工艺，为生物天然气实现规模化应用提供技术后盾，弄清生物天然气全生命周期碳足迹的核算途径，解析生产阶段碳排放的特征内涵，评价其替换化石能源的减碳潜力，对助力能源结构低碳化转型具有关键现实意义。

一、生物天然气替代化石能源的碳足迹核算方法构建

(一) 核算边界确定

生物天然气替代化石能源碳足迹的核算操作，应囊括从沼气原料收集到运输阶段，直至生物天然气的生产、输送及终端使用的全生命周期范围，原料上游处理阶段，以生物质原料的获取地为起点，有农作物秸秆、畜禽粪便等的收集位置点，直至其被送达沼气发酵厂。在这个工作进程里，收集到的车辆类型、具体行驶路线、运输的实际距离等，都影响能耗与碳排放，

应精准界定，基于 MDEA 胺法脱硫脱碳技术，中游采用了胺洗提纯工艺，当发酵生成的沼气进入提纯装置那一刻起，直至产出达到既定标准的生物天然气，涵盖装置内各类设备运行情况、能量转换现象及药剂参与的化学反应环节，都纳入核算界限^[1]。下游能源的替代进程，以生物天然气进入输送管道为开端，直至其于终端用户处替代化石能源（像家庭燃气、工业燃料等）完成能量转换与利用，全面覆盖生物天然气在能源市场的流通及使用事项，以清晰区分各阶段界限达成，为精准核算碳足迹打好基础。

（二）核算参数选取

原料种类、发酵工艺、发酵时间等相关因素对沼气产生量有影响，采用畜禽粪便作为原料，处于中温厌氧发酵的情形下，每千克干物质大约会产出 0.3-0.5 立方米沼气，原料运输所消耗的能量与运输工具自身的能耗特性密切相关，像柴油货车承担生物质原料运输，百公里的耗油量大致为 20-30 升，基于柴油的碳排放系数，能换算出与之匹配的碳排放。核心采用 MDEA 胺法工艺，约 200kW 总装机功率的装置可实现 20000Nm³/d 处理量，1 小时的运行会消耗 200 度电，依照当地电网电力既定的碳排放系数，由此可得出电耗引发的碳排放，大约每小时消耗 0.96 吨蒸汽，蒸汽生产当中燃料（如煤炭、天然气等）的消耗量及其碳排放系数，关乎着蒸汽能耗碳排放的多少。胺液、消泡剂等药剂实际使用量，再加上其生产及运输阶段的碳排放系数，同样需要精准考量^[2]。倘若生物天然气替换煤炭，煤炭单位能耗所对应的碳排放因子高，约每千克无烟煤可排放 2.6-3.0 千克二氧化碳；要是天然气进行替代，该单位能耗对应的碳排放因子相对要低，约每立方米排放 1.8-2.2 千克的二氧化碳，作为核算替代过程减排量的关键，就是这些数据。

（三）核算模型建立

构建基于生命周期评价（LCA）的“原料-生产-替代”全链条碳足迹核算模型。原料阶段量化生物质收集、运输能耗与沼气产生碳排放，按参数经数学公式计算，像原料运输碳排放依运输距离、单位距离油耗和柴油碳排放因子得出。生产阶段汇总 MDEA 胺法工艺电耗、蒸汽能耗、药剂碳排放，电耗碳排放由耗电量和电力碳排放系数确定。下游替代阶段按生物天然气替代量与不同化石能源单位能耗碳排放因子，算出减少的碳排放量。模型整合各环节碳排放，量化生物天然气替代化石能源各阶段及整体碳排放量，为分析减排潜力提供依据。

二、基于胺洗工艺的生物天然气生产阶段碳足迹分析

（一）MDEA 胺洗工艺的碳放在生产阶段的占比

生物天然气生产阶段 MDEA 胺洗工艺碳排放复杂，20000Nm³/d 装置总装机功率约 200kW，全天运行日耗电 4800 度，当地电网每度电二氧化碳排放 0.8 千克，仅电耗日碳排放约 3840 千克，蒸汽消耗 0.96t/h，日运行 24 小时耗 23.04 吨，蒸汽以煤炭为燃料，煤炭碳排放系数每千克排 2.6 千克二氧化碳，生产 1 吨蒸汽耗 0.2 吨煤炭，蒸汽能耗日碳排放 12081.6 千克。药剂生产、运输和使用间接碳排放也重要，胺液作为核心药剂，生产经多步反应与提纯，每吨胺液从原料到成品综合能耗碳排放达数吨，消泡剂等辅助药剂虽用量少，其生产运输碳排放也影响整体。MDEA 胺洗工艺生产阶段能源直接与药剂间接碳排放占比大，是评估该阶段碳足迹关键。

（二）关键影响因素剖析

原料气中 CO₂、H₂S 浓度对 MDEA 胺洗工艺能耗及碳排放影响明显。原料气中 CO₂、H₂S 浓度上升时，系统单耗跟着增加。吸收过程里，MDEA 溶液要吸收更多酸性气体，为达到规定净化指标，胺液循环量得相应加大。就像原料气中 CO₂ 浓度从 10%升到 20%，胺液循环量或许要提高 50%-100%，这直接让输送胺液的泵类设备能耗大幅增加，电耗上升，进而使碳排放增多。再生阶段，胺液负载更高浓度酸性气体，需要更多热量解析出 CO₂ 和 H₂S，蒸汽消耗变多，进一步增加碳排放。从装置规模效应来看，对比不同处理规模项目，比如 10000 方/日和 20000Nm³/d 装置，随着装置规模扩大，单位生物天然气生产的能耗呈下降趋势。20000Nm³/d 装置在设备选型、工艺流程优化等方面更有优势，能实现能量梯级利用和资源共享，降低单位碳足迹^[3]。像在蒸汽供应系统，大装置可采用更高效的锅炉和蒸汽分配网络，减少蒸汽损耗，降低能耗及碳排放。

（三）与其他生物天然气生产工艺的碳足迹对比

MDEA 胺洗工艺在一次性剔除 CO₂ 和 H₂S 方面展现别样优势，与其他采用多步处理方式的工艺相比，在碳足迹的呈现上有明显差异，某些传统工艺得先进行脱硫操作，然后独自开展脱硫操作，牵扯多个反应装置及工艺环节，设备启停及物料输送等过程能量消耗较高。MDEA 胺洗工艺凭借 MDEA 溶液与 CO₂、H₂S 反应呈现的不同特性，在同一吸收塔达成一次性脱除，拿某采用分步处理工艺的生物天然气生产厂和采用 MDEA 胺洗工艺的生产厂进行对比，分步处理工艺厂因实施多步操作，设备运转所耗时间偏长，较 MDEA 胺洗工艺厂，电耗增长 30%-50%，蒸汽等能源消耗同样相应增长。在药剂使用相关方面，分步工

艺大概要多种药剂，于生产、运输和使用过程，其碳排放的总量超出 MDEA 胺洗工艺单一药剂体系，MDEA 胺洗工艺以流程紧凑、能耗低等特点为凭借，在减少排放上潜力突出，于生物天然气生产工艺而言，其碳足迹具备明显优势。

三、生物天然气替代化石能源的减排潜力评估

（一）替代不同化石能源的减排量计算

把生物天然气高位发热量 $37.06\text{MJ}/\text{m}^3$ 、甲烷含量 $>99.8\%$ 当作计算的基准，着手能源替代量的相关计算，煤炭平均低位发热量近似为 $20.93\text{MJ}/\text{kg}$ ， 1.77 千克煤炭的发热量大约和 1 立方米生物天然气发热量一样。若拿天然气来做对比考量，一般其高位发热量是在 $35\text{--}39\text{MJ}/\text{m}^3$ 这个范围，生物天然气跟天然气情况相近，以 $37\text{MJ}/\text{m}^3$ 为计， 1 立方米生物天然气大约能替代 1 立方米常规天然气，从碳排放因子角度看，煤炭的碳排放因子偏高，无烟煤每千克燃烧排放的二氧化碳量，可达 $2.6\text{--}3.0$ 千克，烟煤排放大概是 $2.1\text{--}2.7$ 千克。按 2.6 千克每千克无烟煤的换算系数计算，替代掉 1.77 千克的煤炭资源，大约可削减 4.60 千克的二氧化碳排放，碳排放因子而言，天然气相对较低，约每立方米排放 $1.8\text{--}2.2$ 千克二氧化碳，按每立方米二氧化碳排放 2 千克计， 1 立方米生物天然气对天然气的替代，可减少 2 千克二氧化碳排放，来自浙江嘉兴年产 280 万方生物天然气项目的数据显示，每立方米生物天然气可实现 $2.21\text{--}3.80\text{kgCO}_2\text{e}$ 的温室气体减排效益，进一步凸显了生物天然气替代化石能源在减排量上的可观潜力。

（二）不同应用场景下的减排潜力分析

在发电对应的场景，以浙江 1.2MW 沼气发电项目及浙江杭州年产 500 万方生物天然气项目为参照对象，燃煤发电呈现出较高的碳排放强度，每生成一度电力，若把煤炭作为能源燃料，每千瓦时所需煤耗约 $300\text{--}350$ 克标准煤，大约会对应排放 $0.78\text{--}0.91$ 千克的二氧化碳。生物天然气呈现出较高发电效率，若以发电效率 40% 计算， 1 立方米高位发热量 $37.06\text{MJ}/\text{m}^3$ 的生物天然气，大概能发 4.09 千瓦时的电，以每立方米生物天然气进行发电，对比之下的燃煤发电，大概可减少二氧化碳排放 $2.49\text{--}2.91$ 千克左右。在燃料所涉场景之内，交通领域用生物天然气替代化石燃料也有显著的减排潜力，大约每升汽油会产生 $2.3\text{--}2.6$ 千克二氧化碳的碳排放因子，每升柴油大概排放 $2.6\text{--}2.9$ 千克的二氧化碳^[4]。生物天然气与压缩天然气的能量密度大体相近，从能量角度看， 1 立方米生物天然气大致相当于 $0.7\text{--}0.8$ 升汽油或 $0.6\text{--}0.7$ 升柴油，替代汽油情况而言，用

1 立方米生物天然气替代汽油，约可削减 $1.61\text{--}2.08$ 千克的二氧化碳排放量，在交通燃料范畴呈现出良好的减排潜力。

（三）基于胺洗工艺特性的减排优势分析

MDEA 胺洗工艺依仗着可一次性去除 CO_2 和 H_2S 、提纯效率不错（成品气甲烷含量 $\geq 99\%$ ）的特点，赋予生物天然气替代化石能源时独有的减排优势，此工艺保障生物天然气里杂质极微，促使燃烧过程实现更充分效果，能源利用效能显著上扬。跟其他含杂质较高的生物天然气以及化石能源相较而言，就同等发热量需求的情况而言，经该工艺生产出来的生物天然气用量少，由此降低了碳排放量，在生产进程里，MDEA 胺洗工艺体现出相对较低的能耗，就 $20000\text{Nm}^3/\text{d}$ 装置举例说明，其能耗数据处于相对优良水平，在能源消耗阶段减少了碳排放总量，该工艺展现出对原料气的强适应性，可以有效处理 CO_2 和 H_2S 浓度各异的原料气，实现生物天然气稳定又高效的生产，为大规模替换化石能源筑牢坚实根基，进一步挖掘了生物天然气在减排领域的潜力。

结语：

生物天然气替代化石能源于碳减排领域潜力突出。MDEA 胺洗工艺具备高效提纯特质，为生物天然气生产筑牢根基，全生命周期碳足迹核算方式，清楚展现各环节碳排放量。不同情形下的减排量测算，凸显其在能源转型里的意义，今后要不断优化工艺，促使生物天然气在低碳能源体系中释放更大效能。

【参考文献】

- [1]董颖涛,冉龙飞,张萌,等.基于 AHP-熵权法的生物天然气项目全生命周期环境影响评价研究[J].当代化工, 2025, 54 (02): 433-439.
- [2]尹亚杰,贾小平,万均.以畜禽粪便为原料的生物天然气能源潜力和碳强度分析[J].山东化工, 2024, 53 (11): 256-259+264.
- [3]李玲.三重意义正在凸显生物天然气发展前景可期[J].大众投资指南, 2024, (01): 8-9.
- [4]冉龙飞,高丽娟,贾宝,等.以畜禽粪污为原料的生物天然气项目碳减排效益分析[J].中国沼气, 2023, 41 (05): 50-54.

作者简介：杨云峰，男，出生年份：1987 年 1 月，汉族，籍贯：浙江嘉兴，学历：本科，职称：工程师，研究方向：沼气提纯制生物天然气、沼气发电能新能源方向。