

# 油藏环境下地层固碳菌高通量筛选及代谢活性评价体系构建

董 丁 季 凯 余何美哲

克拉玛依市新奥达石油技术服务有限公司 新疆 克拉玛依市 834000

**【摘要】**：油藏环境中的地层固碳菌具有重要的碳固定潜力和环境调节价值，建立高效筛选与代谢活性评价体系对于能源开发与碳减排具有双重意义。针对油藏复杂的地质与化学条件，设计高通量筛选方法能够快速识别高效固碳菌群，并结合代谢通量与酶活性分析，实现对微生物碳固定能力的系统评价。该体系不仅可为二氧化碳地质封存和油藏改造提供技术支撑，还能推动固碳机理在能源领域的拓展应用。研究成果有望促进碳中和战略下的微生物工程创新与资源可持续利用。

**【关键词】**：油藏环境；地层固碳菌；高通量筛选；代谢活性评价；碳固定

DOI:10.12417/2705-0998.25.15.031

## 引言

油藏环境下的碳循环过程具有独特的地质与生物学特征，其中微生物固碳功能在调控碳平衡与促进碳汇形成方面展现出重要作用。地层固碳菌能够在高温、高压及复杂化学组成的环境中保持代谢活性，其碳固定潜力对于能源开发与环境治理均具有现实价值。近年来，高通量技术的快速发展为微生物资源的系统筛选与功能评价提供了可行路径，使得从庞大微生物群落中发现高效固碳菌成为可能。通过构建代谢活性评价体系，不仅能够揭示不同固碳菌群的代谢差异，还可为二氧化碳地质封存与油藏开发提供可靠依据。在低碳与可持续发展目标的推动下，探索油藏环境中固碳微生物的筛选与评价方法已成为能源与环境科学交叉研究的重要方向。

## 1 油藏地层固碳菌生态分布特征与固碳潜力分析

### 1.1 油藏环境理化条件对固碳菌群落结构的影响

油藏地层常处于高温、高压和缺氧条件下，伴随硫化物、烃类以及盐度的复杂变化，这些特殊的理化条件对固碳菌群落结构具有显著调控作用。高温可筛选耐热型固碳菌，提升其对无机碳源的利用效率；高压条件下固碳菌的代谢途径趋于简化，能更有效地利用氢气、甲烷等电子供体完成碳固定反应。高盐度环境则促进耐盐菌株的出现，使部分嗜盐固碳菌在盐离子浓度波动中依然保持碳固定能力。油藏中常见的还原性环境有助于厌氧固碳菌的繁殖，这些菌群在二氧化碳的还原和矿化过程中发挥关键作用。理化因子的共同作用使固碳菌群落结构呈现出独特的多样性和功能分化。

### 1.2 典型固碳菌种类及其功能基因分布特征

油藏环境中存在多类具备固碳潜力的典型菌种，如甲烷氧化菌、硫化菌和氢氧化菌，这些微生物依赖多样化的代谢途径实现二氧化碳的同化。甲烷氧化菌利用甲烷单加氧酶和甲醇

脱氢酶完成甲烷转化，并间接固定碳源；硫化菌通过硫代谢产生能量驱动卡尔文循环；氢氧化菌则依靠氢酶调控氢气氧化反应促进碳固定。功能基因的分布表现为关键酶基因（如RuBisCO、碳酸酐酶和乙酰辅酶A合成酶）的高丰度聚集，这些基因在群落水平上决定了碳固定速率和效率。基因组学研究揭示不同固碳菌的适应策略差异，体现出在油藏环境下的生态竞争与协同特征。

### 1.3 固碳菌在油藏碳循环过程中的生态作用机制

在油藏地层中，固碳菌通过多种代谢路径参与碳循环过程，形成微生物群落间的复杂互作网络。部分菌群利用厌氧呼吸将二氧化碳还原为甲烷，促进甲烷循环并为甲烷营养型生物提供碳源；另一些菌株则通过乙酰辅酶A途径将无机碳转化为有机酸，为油藏中的异养菌群提供底物。碳酸盐矿化过程在固碳菌参与下加速，导致无机碳在矿物结构中的沉积固定。油藏内部碳循环不仅依赖固碳菌自身代谢，还受到与产甲烷菌、硫酸盐还原菌等功能菌群的互作调控，表现为能量与碳流的交替传递。这一机制强化了油藏中二氧化碳的封存潜力，同时改变了微生物群落的稳定性和生态功能。

## 2 油藏环境下固碳菌高通量筛选技术路径优化研究

### 2.1 样品采集与预处理方法对筛选效率的影响

油藏地层样品的采集直接决定后续固碳菌筛选结果的可靠性。深部取样过程中需避免氧化和污染，以保证微生物群落原始结构不被破坏。高压取样设备可维持油藏压力环境，使压力敏感型菌株得到有效保存。样品预处理环节中常采用分级离心、稀释培养和选择性富集等方法，减少非目标菌干扰并提高固碳菌检出率。部分研究提出在预处理阶段引入模拟油藏条件的培养基，以提高固碳菌活性保持率。有效的采集与预处理方法不仅提升筛选效率，还为后续分子检测和功能分析奠定基础。

## 2.2 分子生物学与代谢组学技术在高通量筛选中的应用

高通量筛选需要依托分子生物学和代谢组学工具实现对固碳菌的快速鉴别。16SrRNA 高通量测序可揭示群落结构和固碳相关基因的分布特征；宏基因组学方法能够解析关键代谢通路，识别潜在高效固碳菌株。代谢组学技术则通过检测代谢产物的种类与浓度，提供碳固定活性的间接证据。联合代谢流分析可追踪碳源在不同代谢环节中的分配情况，进而筛选出碳利用效率高的菌株。这些方法结合能够在大规模样品中快速锁定功能菌群，为筛选体系的建立提供科学依据。

## 2.3 固碳菌高通量筛选平台构建的关键技术环节

构建高通量筛选平台需要整合自动化、微流控和信息学分析技术。自动化设备可实现大规模样品的快速处理与检测，保证筛选结果的稳定性。微流控芯片提供了单细胞水平的培养与分析环境，能够在高通量条件下获取菌株间的功能差异信息。信息学平台则负责整合基因组、代谢组和表型数据，实现多维度数据的快速比对和筛选。平台运行中对数据质量控制至关重要，必须建立标准化流程以减少偏差。关键技术环节的优化不仅提升筛选效率，还确保结果的可重复性和可扩展性。

## 3 地层固碳菌代谢活性多维度评价指标体系构建

### 3.1 碳固定速率与关键酶活性的定量评价方法

固碳菌代谢活性的评价可以从碳固定速率与关键酶活性两个方面展开。碳同位素示踪实验能够准确反映二氧化碳被吸收与固定的速率及转化效率，而放射性同位素标记方法则能清晰追踪无机碳在不同代谢产物中的分布路径。关键酶如 RuBisCO、碳酸酐酶等的活性检测，为碳固定功能的强弱提供直观指标。通过将酶活性水平与碳固定速率进行关联分析，不仅能揭示菌株间在碳固定效率上的差异，还可为筛选适应复杂油藏环境的高效固碳菌提供定量依据，构建更具科学性的评价体系。

### 3.2 代谢通量分析与能量转换效率测定

代谢通量分析能够揭示碳源在不同代谢网络中的分配路径，反映固碳菌在能量利用上的动态特征。通过稳定同位素标记结合代谢流建模，可以追踪二氧化碳进入有机产物的比例，明确其在多条代谢通路中的分流情况。能量转换效率测定则常与 ATP 生成速率及还原当量消耗水平结合，评估碳固定过程中能量供需的平衡。不同菌株在通量大小和能量转化率上的差异，往往反映出其对高压、高温或缺氧条件的适应性。利用这些指标能够有效筛选出碳利用效率更高、代谢更稳定的功能菌株，为油藏环境下固碳菌应用提供量化依据。

### 3.3 多环境模拟下固碳菌代谢稳定性与适应性研究

固碳菌代谢稳定性与适应性评价需在模拟多种极端环境下展开。高温高压模拟系统可重现油藏环境，检验菌株在

长期应力下的代谢持续性。盐度与 pH 变化实验则用于揭示菌群在离子浓度波动及酸碱环境改变中的生存与代谢表现。通过动态培养条件下监测关键代谢产物和酶活性水平，可以判断固碳菌是否具有持续碳固定潜力。多环境模拟不仅帮助识别耐受性强的菌株，还能反映其在多因子耦合作用下的代谢稳定性。相关研究结果为固碳菌在实际油藏中的应用适配性提供了可靠参考。

## 4 固碳菌功能评价在二氧化碳地质封存与提高采收率中的应用探索

### 4.1 固碳菌促进二氧化碳矿化与长期封存的作用机制

固碳菌在油藏环境中能够通过一系列代谢反应加速二氧化碳的固定与矿化，形成稳定的无机碳沉积。部分菌群分泌碳酸酐酶，加速二氧化碳与碳酸氢盐的相互转化，使溶解态二氧化碳迅速进入矿物反应链条。某些菌群释放的有机酸会改变孔隙水的酸碱度，促使碳酸钙、碳酸镁等矿物的形成速度提升。高压高温条件下，固碳菌代谢产物与金属离子的结合更为紧密，有助于生成难溶性的碳酸盐晶体。这些矿物在地层中能够长期稳定存在，避免二氧化碳重新释放到储层流体中。固碳菌代谢与矿物化学反应相互作用，使油藏具备更高的碳封存效率，为地下长期碳存储提供了可靠的生物学支撑。

### 4.2 固碳菌在提高原油采收率过程中的潜在价值

油藏中固碳菌在代谢过程中能够分泌多种具有工程应用价值的产物，促进原油采出。部分菌群在固碳时释放表面活性物质，使原油与孔隙水之间的界面张力降低，从而改善原油流动状态，增加可采性。另一类固碳菌能代谢产生有机酸，腐蚀或溶解部分矿物质，扩大储层孔隙度和渗透性，形成新的流动通道。部分代谢途径还会生成气体，包括二氧化碳和氢气，这些气体在储层中可增加驱替压力，推动原油向生产井方向迁移。与传统的化学驱油方式相比，固碳菌的应用减少了化学剂的注入量，降低了环境风险和成本。固碳菌的多重代谢效应使其在提高采收率过程中具备独特优势。

### 4.3 固碳菌与油藏化学改造协同作用机理研究

固碳菌的代谢产物在油藏化学改造中展现出明显的协同效应，提升了储层改造效率。部分菌群代谢过程中产生的有机酸可加速矿物质溶解，使注入的化学改造剂更易进入微孔隙，从而增强孔隙连通性。部分固碳菌在固定二氧化碳时生成的气体能在储层中增加压力，与注入气体形成叠加效应，改善驱替作用。菌群代谢改变了局部微环境的氧化还原状态，使某些化学剂的反应速率得到提升或抑制，从而实现更高效的矿物转化。微生物和化学剂之间的互补关系，使油藏改造过程在渗透性改善、孔隙度增加及流体驱替方面展现出更强效果。这一机理为复合型油藏改造提供了新的技术支撑。

## 5 构建油藏固碳菌应用转化的工程化技术与实践路径

### 5.1 固碳菌功能菌株资源库的建立与应用推广

建立系统化的固碳菌功能菌株资源库是推动工程应用的核心环节。通过从不同油藏环境中分离筛选高效固碳菌株，并对其基因组测序和代谢特征解析，可形成一个包含多类型菌株的储备体系。资源库需详细记录菌株的生理特性、耐受范围和关键酶基因分布，以便快速选择适应特定环境的菌株。功能菌株保存依赖低温冻存、真空干燥或液氮保存等技术，以确保菌群活性长期保持。配合规模化扩增培养，可在短时间内提供大量活性菌株应用于现场试验。资源库还需建立共享平台，支持科研和工程单位进行快速调取与应用推广，为油藏碳封存和能源开发提供长期的菌种保障。

### 5.2 油藏微生物固碳与能源开发一体化的工程模式探索

在油藏开发过程中，固碳菌应用可与能源开采形成紧密结合，实现一体化的工程模式。通过在注入体系中引入固碳菌与专用营养物质，可以在地层中同步实现二氧化碳的固定与原油驱替。菌群在碳固定的同时释放有机酸和表面活性物质，改善油藏孔隙结构与原油流动性，提升采收率。针对不同油藏类型，可设计差异化菌群组合，确保菌群在高温高压或高盐环境下仍能保持代谢活性。注入方案需要结合油藏地质条件、孔隙水化学特性以及二氧化碳浓度等因素，以最大化微生物与油藏过程的耦合效果。这种模式不仅提高了碳封存与能源利用的协同效

益，也为油藏开发提供了新的绿色技术路径。

### 5.3 固碳菌应用过程中的风险评估与可持续管理方案

在固碳菌工程化应用过程中，风险评估与管理至关重要。固碳菌的引入可能改变原有微生物群落结构，导致潜在的生态失衡风险，需要通过群落动态监测加以控制。部分代谢产物可能引发油藏矿物结构过度溶解或形成不期望的沉积物，对储层稳定性造成影响，因此必须建立实时监测手段。长期应用中还需关注菌群的遗传漂变，防止功能基因丢失或突变导致固碳能力下降。可持续管理方案包括建立分层监控体系，对菌群代谢产物、碳固定效果及储层物性进行长期追踪，并在必要时调整注入配方或更换菌株类型。通过动态评估与灵活管理，可以保障固碳菌应用的安全性和长期效益，推动其在油藏工程中的稳定运行。

## 6 结语

本文围绕油藏环境下地层固碳菌的高通量筛选与代谢活性评价体系展开系统探讨，从生态分布与功能特征入手，深入分析了筛选技术路径和多维度评价指标的构建，并进一步阐述了其在二氧化碳地质封存及提高原油采收率中的应用潜力。固碳菌在复杂环境下展现出较强的代谢稳定性和适应性，其代谢产物与化学改造技术的协同作用也为能源开发提供了新的思路。通过建立菌株资源库与工程化应用模式，可为推动碳中和战略目标的实现提供切实可行的生物学支撑。

## 参考文献:

- [1] 刘鹏飞,周倩.油藏微生物固碳作用及其环境适应性研究[J].石油勘探与开发,2022,49(6):1258-1268.
- [2] 陈浩宇,孙雅楠.高通量技术在油藏功能菌群筛选中的应用进展[J].微生物学通报,2023,50(7):2459-2469.
- [3] 韩志成,王清怡.二氧化碳地质封存过程中微生物矿化机制探析[J].环境科学学报,2021,41(12):5021-5032.
- [4] 杨志远,高丽萍.油藏微生物提高采收率的新型途径与实践探索[J].石油与天然气地质,2024,45(3):678-688.
- [5] 周伟东,马佳音.地层固碳菌代谢活性评价及其在碳循环中的作用[J].生物工程学报,2022,38(9):3265-3276.