

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.03.02

引用格式: 罗娜, 穆红梅. 油藏微生物在油气开发中的应用及展望[J]. 中国地质调查, 2024, 11(3): 9-16. (Luo N, Mu H M. Application and prospects of reservoir micro-organisms in oil and gas development [J]. Geological Survey of China, 2024, 11(3): 9-16.)

油藏微生物在油气开发中的应用及展望

罗娜¹, 穆红梅^{2*}

(1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 油藏是典型的高温、高压、高矿化度且厌氧的多重极端环境, 油藏微生物是其中重要的组成部分。研究油藏微生物对阐明油气资源的形成、生物地球化学循环及生命起源与进化等过程有重要意义。通过文献调研, 对油藏中微生物的相互作用方式、机理和主要功能进行了阐述, 对油藏微生物在提高石油采收率、石油污染生物修复以及碳捕集、利用与封存 (carbon capture, utilization and storage, CCUS) 等领域中的作用机理和应用进展进行了总结, 并提出了未来在利用油藏微生物过程中还需要解决的关键问题。油藏微生物在油气勘探及环境修复应用中具有经济成本较低和环境友好的优势, 未来具有良好的应用前景。研究成果可为油藏微生物的研究和应用提供参考。

关键词: 油藏微生物; 石油地质; 提高采收率; 碳捕集、利用与封存; 环境修复

中图分类号: P618.13; TE19

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2024)03-0009-08

0 引言

微生物是对长宽为0.1 mm及以下的小生物统称, 包括细菌、古菌、病毒和部分真核生物。微生物几乎存在于任何生态系统中, 并且发挥着重要的功能。Bar-On等^[1]对全球生物量的普查结果显示全球约90%的细菌和古菌栖息在深部地下环境, 这些微生物共同构成了深部地下生物圈。油藏是深部地下环境的重要组成部分, 也是一个典型的高温、高压、高矿化度且厌氧的多重极端环境, 特殊的环境造就了独特的生态系统^[2]。油藏中的微生物种类繁多、代谢途径多样, 在油气资源的形成、生物地球化学循环及生命起源与进化等过程中发挥着至关重要的作用。

为了应对油藏的极端环境, 油藏中的微生物进化出了复杂的分子适应能力。这些能力影响着油藏微生物的初级和次级代谢途径, 它们由此演变出了独特的生理特征和代谢过程。随着对微生物之间及微生物与环境之间相互作用的认识的不断深

入, 以及生物化学技术的不断进步, 相关学者在油藏微生物的应用方面开展了一系列研究工作^[3-5], 如提高石油采收率、石油污染生物修复及碳捕集、利用与封存 (carbon capture, utilization and storage, CCUS) 等, 取得了众多创新认识和成果。油藏微生物在应用过程中具有经济环保、工艺简单等优势, 可作为低渗透、边际和枯竭油藏开发、石油污染环境修复, 以及二氧化碳生物转化的重要储备技术。然而, 微生物作为一种有生命活性的生物, 发挥相关功能的菌群在不同地质条件下的相互作用规律尚未被完全揭示, 导致现场应用效果并不稳定。因此, 还需对油藏微生物进行深入研究以扬利弊害。本文对油藏微生物在上述领域中的应用进行梳理总结, 可为后续油藏微生物的研究和应用提供参考。

1 油藏微生物类型和相互作用方式

油藏既是一种典型的多重极端环境, 又是油、气、水共存的多孔介质环境^[6], 不同形成过程和地质条件的油藏环境差异显著。油藏地层温度变化范围

收稿日期: 2024-05-16; 修订日期: 2024-06-07。

基金项目: 国家重点研发计划“油藏环境合成微生物组的构建(编号: 2018YFA0902100)”项目资助。

第一作者简介: 罗娜(1992—), 女, 博士研究生, 主要从事石油地质方面的研究工作。Email: 754406042@qq.com。

通信作者简介: 穆红梅(1987—), 女, 博士后, 主要从事环境微生物方面的研究工作。Email: muhm@tsinghua.edu.cn。

为 30 ~ 200 °C, 压力变化范围从数兆帕到上百兆帕, 矿化度可达 20 g/L 以上^[7], 这种特殊的极端环境造就了油藏独特的微生物生态系统。这些环境条件也导致不同油藏中的微生物种类和数量存在较大差异, 目前已在油藏中检测到类型多样的细菌、古菌和病毒。其中, 细菌是油藏中数量最多、分布最广的微生物类群, 且变形菌门、厚壁菌门、拟杆菌门和放线菌门是检测频率最高的细菌类群。

在油藏生态系统中, 微生物之间并不是孤立存在的, 而是相互影响形成复杂的生态相互作用网络, 从而以微生物群落的形式存在。为了简化复杂的相互作用, 通常将两个微生物之间的相互作用分为 6 种生态类型(图 1), 包括: 互利共生, 即双方对彼此都产生了有利影响; 偏利共生, 即只有一方对

另一方产生了有利影响; 中立, 即双方对彼此都没有影响; 偏害共生, 即只有一方对另一方产生了不利影响; 剥削, 即一方对另一方产生了有利影响, 但另一方对一方产生了不利影响; 竞争, 即双方对彼此都产生了不利影响^[8]。研究表明这些相互作用决定了油藏微生物群落的功能^[9]。例如, Hao 等^[10]从新疆油田分离出一株非石油降解菌, 当其与另外 3 株同时分离于新疆油田的细菌共培养时, 构成的 4 成员微生物群落对石油的降解率达 77.75%, 这相比不添加非石油降解菌的降解率提高了 28.8%。表明在微生物群落中添加非石油降解菌后, 有利于通过微生物间的相互作用提高整个微生物群落对石油的降解能力, 显示出微生物相互作用对微生物群落功能的生态学意义。

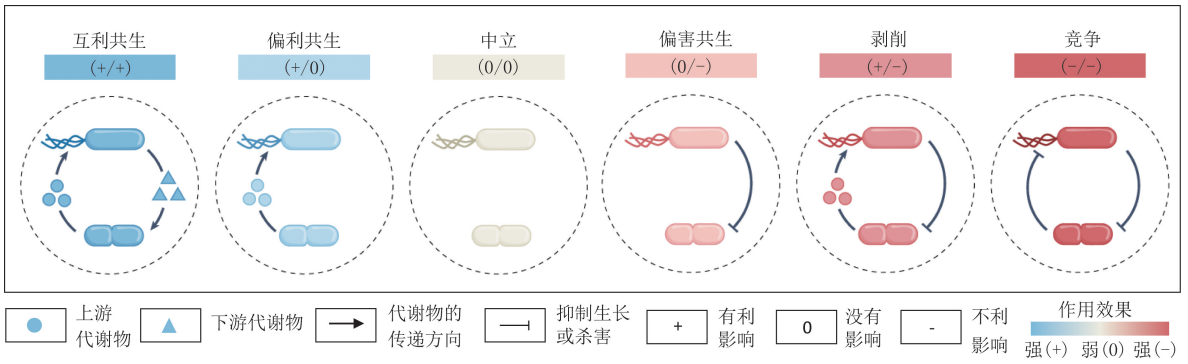


图 1 油藏微生物间的相互作用类型

Fig. 1 Interactions types among reservoir micro-organisms

过去数十年的研究揭示了油藏环境中微生物的许多功能信息, 强调了其在油藏生物地球化学循环、石油形成与转化、生命起源与进化等过程中的关键作用。根据功能可以将油藏微生物大致划分为 6 类, 分别是烃氧化菌、发酵菌、硫酸盐还原菌、硝酸盐还原菌、产甲烷菌和铁氧化菌^[11]。这些功能微生物通过相互作用共同参与了原油降解, 并形成密切的代谢网络(图 2)。在油藏中, 微生物能够利用的碳源主要是原油, 烃氧化菌体内的烃类降解酶可以通过一系列的生物化学反应将原油中的烃类分解为脂肪酸、醇类和芳香族化合物等。这些代谢产物又可以作为发酵菌的碳源, 进一步代谢产生小分子有机酸、氢气(H₂)、二氧化碳(CO₂)和醇类物质。最终, 这些代谢产物又可以被产甲烷菌、硫酸盐还原菌、硝酸盐还原菌和铁氧化菌代谢, 用于自身的繁殖, 形成一个完整的生态相互作用网络^[12]。

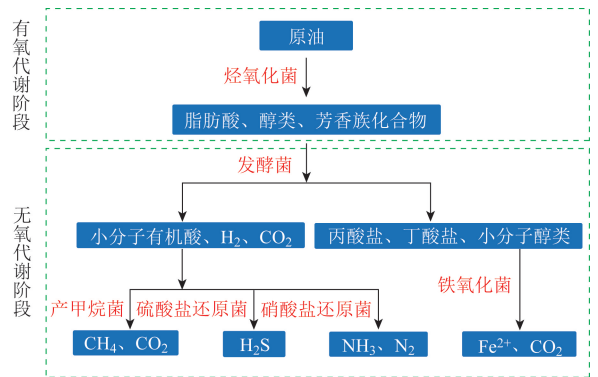


图 2 油藏微生物代谢网络示意图

Fig. 2 Schematic diagram of reservoir micro-organisms metabolism network

2 油藏微生物在油气开发中的应用

2.1 提高石油采收率

近年来, 随着越来越多的老油田进入到采出程

度高、含水率高的“双高”阶段,我国石油产量呈现出稳中带降的特点,维持2亿t年产量的目标将越来越难以实现。与此同时,我国的石油对外依存度从2009年首次超过50%的安全警戒线以来逐年上升,至2023年为72%,这对我国的能源安全和国家安全构成了重大威胁。虽然风能、氢能、太阳能和核能等多种新能源发展迅速,但是在较长一段时间内依旧无法替代石油,更何况在涉及到国计民生的其他领域,如农业、运输、建材、金属加工、制药和纺织等,石油都发挥着无可替代的重要作用,因此提高石油采收率具有重要的战略意义^[13]。

目前提高石油采收率的方法主要有化学驱、气驱和热驱3大类,从提采产量的贡献来看热驱占主要地位。这些提高石油采收率技术的共同特点是注入的工作介质能够快速改变原油性质和流动状态,从而增大产量。然而,这些提采手段除了在实际应用时受到储层条件和原油性质的诸多限制,还存在另外两个问题:一是经济成本高,大量化学药剂的注入使得化学驱成本居高不下,气源的成本虽然较化学药剂低,但受到气源条件的限制,加上配套管道设施建设,导致气驱的成本也十分巨大,热驱需要将大量热量直接作用在储层原油上,热传递效率低、能耗高、配套设备多,使得热力采油的经济效益最低;二是对环境破坏严重,化学药剂的注入会极大地破坏储层环境,同时化学驱废料处理难度较大,对地面水体和土壤环境的威胁也较大。在国际原油价格低迷、环保要求日益增高的形势下,微生物提高石油采收率(microbial enhanced oil recovery, MEOR)技术因其经济成本低和环境友好的优势,已经成为一种发展迅速的提高石油采收率技术,是生物工程技术在油田开发领域开拓性的应用^[14]。

MEOR技术是利用微生物及其代谢产物改变原油性质和流动状态,从而进行有效驱油的采油方法。因此,充分了解微生物在油藏中的生命活动是实现MEOR技术的关键。自1926年美国科学家Beckman提出MEOR的设想至今,人们对MEOR机理的认识已经日趋完善,目前认为MEOR的机理分为两大类(表1),即微生物本身的作用和微生物代谢产物的作用,这两种作用的对象可以是原油或岩石,最终目的是启动不能流动的残余油,同时降低能流动残余油的黏度^[15-16]。根据微生物来源不同,MEOR技术可分为外源微生物驱油技术和内源微生物驱油技术两种^[17]。外源微生物驱油技术又

称地面法,是在地面将采油微生物发酵培养,然后将发酵液或者代谢产物注入油藏中,这种方法见效快但经济成本较高;内源微生物驱油技术又称油层法,是把油藏看作一个生物反应器,通过注入营养物(主要是氮、磷、生长因子等)激活地层中的功能微生物,利用其在油藏环境中的生长繁殖和代谢活动,产生有利于驱油的代谢物质,作用于油藏和油层流体,实现提高油井产量的目的^[18]。内源微生物采油技术是低油价时代最具发展前景的采油技术之一,被评为2016年国际石油十大科技进展之一。

表1 微生物提高石油采收率的机理

Tab. 1 Mechanism of microbial enhanced oil recovery		
类型	提采对象	提采机理
微生物本身的作用	微生物细胞	增加注入水中颗粒的粒径,起到堵水调剖作用
	微生物降解	以原油为碳源和能源,降解原油中的大分子,提高原油的流动性
微生物代谢产物的作用	表面活性物质	降低水/油/岩石界面的张力,乳化原油,改变润湿性
	生物气	气体溶解原油,改善流动状态,增加驱动压力
	生物酸	溶解孔隙和吼道中的碳酸盐物质,有机酸与胶结物反应产生CO ₂
	生物有机溶剂	降低原油黏度,溶解孔隙中的重质组分
	生物聚合物	提高驱动相黏度,改变流度比,封堵水窜通道
	生物酶	降解烃类,生成气体、有机酸、有机溶剂和表面活性剂

近数十年来,随着科技的进步以及人类对油藏微生物认识的不断深化,美国、英国、俄罗斯、德国、澳大利亚、日本、挪威等国在MEOR室内研究及矿场试验方面取得了良好的效果^[19-20]。1992年,俄罗斯先后在罗马什金油田的8个区块进行了外源微生物驱油现场试验,截至2002年累计增油 3.2×10^5 t; 2001年,挪威在北海的Norne油田进行了内源微生物驱油试验,阶段提采率达6%^[21]; 2009年, Town等^[22]在加拿大萨斯喀彻温省的一个水驱油田开展了内源微生物驱油试验,单井产量从1.2 t/d提高到了4.1 t/d,含水率下降了10%,而成本仅6美元/桶。我国在20世纪80年代末通过引进微生物菌种相继在国内多个油田开展了单井微生物吞吐试验,均取得了一定效果。1990年,吉林油田对40多口油井进行了微生物驱油试验,在3年中累计增油数千吨^[23]; 2000年,中国石油在大港油田开展微生物驱油试验,截至2006年11口水

井累计增油 5.4×10^4 t^[24]。自 2008 年开展大量现场试验以来,中国微生物采油技术高速发展,国家科技部持续设立 863 重点项目进行校企联合攻关,促使室内研究和现场试验均取得了长足进步,微生物采油技术总体达到甚至领先于世界先进水平^[25]。2012 年,胜利油田在罗 801 区块开展内源微生物驱油试验,截至 2017 年累计增油 16.37×10^4 t,阶段提采率达 5.62%; 2022 年,中国石油在大庆采油七厂葡南油田针对外围低渗透油层进行的微生物驱油试验中获得了显著效果,阶段投入产出比为 1:3.25,单年多采出 9 400 t 原油^[26]; 2023 年,中国石油在庆新油田开展的 6 注 17 采微生物驱油现场试验中,有 8 口见效油井与试验前相比日增油 14.1 t,含水率下降 4.6%^[27]。然而,由于微生物的生命活动过程十分复杂,它们在不同类型油藏中的行为和相互作用机制尚未得到深入揭示,这导致现场应用效果并不稳定。例如,早期的现场试验选择硫酸盐还原菌作为采油功能菌,只考虑了硫酸盐还原菌降解原油的功能,并没有考虑硫酸盐还原代谢过程产生的硫化氢(H_2S)气体对设备的腐蚀,实践证实选用硫酸盐还原菌作为采油功能菌的弊大于利。

2.2 石油污染生物修复

在石油的开发过程中,一旦石油或有害泥浆发生泄露,会对土壤、地表水和地下水、生物、植被等造成直接或间接的危害,而且很有可能间接危害到该环境中人们的身体健康。传统的处理方法主要有热处理和化学处理,但由于传统方法经济成本较高,且处理不彻底容易产生二次污染,还无法实现产业化规模应用。微生物修复是利用微生物改变石油污染物的物理化学性质,对其在环境中的迁移、转化和降解可产生有利影响,最终实现污染物去除或衰减为危害较小的产物^[28]。该技术以其成本低、环保、修复效果良好等特点已成为石油生态修复中的潜力技术。

微生物修复石油污染技术的关键在于筛选出高效的石油降解微生物。尽管自然界存在种类繁多的石油降解微生物,但作为石油环境的“土著”,油藏微生物具有较强的环境适应能力和极强的降解石油组分的潜力,是修复石油污染的理想候选者。Dellagneze 等^[29]通过建立以石油和酵母提取物为底物的海水微宇宙体系,模拟油藏微生物修复海洋石油泄漏的微观过程,评估了从油藏中分离出

的微球菌、海洋迪茨氏菌和其他 4 种富集的微生物群落对石油的降解能力,结果显示在培养 21 d 后,微球菌和海洋迪茨氏菌对石油的降解率均超过 99%,上述微生物群落对石油的降解率范围为 11%~45%,均表现出较强的原油降解潜力,表明油藏微生物资源可以被有效应用于石油污染地区的生物修复。然而,石油的组成极其复杂,单一微生物或群落往往仅能对其某些组分具有较强的降解能力^[30]。

近年来,合成生物学迅猛发展,为加强微生物修复工程的应用提供了技术支持。合成生物学是在充分认识微生物降解石油污染物代谢机制和途径的基础上,定向设计和改造现有菌株,构建能够降解一种或多种污染物的工程菌株。针对复合型污染,在建立典型污染物代谢、调控和抗逆相关基因元件的模块库基础上,引入人工菌群等策略,对生物系统进行理性设计和组装,构建高效降解群落^[31]。例如,Cui 等^[32]基于最小值算法优化了 3 种石油降解菌之间的混合比例,并结合已报道的石油降解菌群混合构建了一个新的微生物群落。当以 27%、21%、28% 和 24% 的比例分别接种 P3、P10、P14 菌株和石油降解菌群于以石油为碳源的培养基时,石油的降解率为 78.9%,比只接种石油降解菌群的石油降解率高 34.8%。进一步将新构建的微生物群落接种于被石油污染的土壤中,在进行生物修复 20 d 后,污染土壤中的石油被去除了 40%。目前通过合成生物学策略已经构建了多种可降解石油污染物的基因工程菌和菌群,但是在实验室条件下筛选的石油降解微生物可能无法在现场复杂环境中充分发挥作用。因此,要实现微生物修复工程应用仍需进行一系列的深入研究。

2.3 碳捕集、利用与封存

碳捕集、利用与封存是指将 CO_2 从工业生产、能源利用或大气中分离出来,并加以利用或注入地层以实现永久减排的过程,是实现长期绝对 CO_2 减排的必要技术手段,现已在全球得到广泛应用^[33]。在多种 CO_2 封存策略中,将 CO_2 注入枯竭油气藏封存是一项具有应用前景的 CO_2 再生利用技术^[34]。油藏中的微生物不仅可以促进 CO_2 固定,也可以催化 CO_2 转化成高附加值的产物。油藏中的硝酸盐还原菌、解脲菌、铁还原菌、硫酸盐还原菌和构巢曲霉等微生物可通过代谢作用产生碳酸盐矿物,促进

CO₂ 的固化和稳定封存^[3]。例如,巴氏芽孢杆菌能在短时间内生成大量碳酸根(CO₃²⁻),降低地下环境的孔隙率,缓解 CO₂ 注入后的渗漏^[35]。更重要的是,油藏中含有丰富的 CO₂ 还原型微生物,利用这些微生物可以将 CO₂ 转化为一系类有机物,如短链脂肪酸(甲酸、乙酸、乳酸)、醇类(乙醇、丁醇、丁二醇)、酮类和甲烷(CH₄)等。

甲烷是目前应用十分广泛的一种清洁能源,因其能量转化率和利用率较高,成为 CCUS 技术中广受关注的转化产物。油藏中氢营养型产甲烷菌的代谢过程是微生物介导 CO₂ 甲烷化的关键。氢营养型产甲烷菌是一类利用 H₂ 作为电子供体,且利用 CO₂ 作为电子受体产生 CH₄ 和 H₂O 的微生物,这一代谢过程包含了一系列复杂的生化反应:首先,CO₂ 被甲酰甲烷呋喃脱氢酶(Fmd)还原为甲酰基(-CHO),并连接在甲酰呋喃(MFR)的甲酰基上产生 CHO-MFR;随后,甲酰基被转移给四氢甲酰喋呤(H4MPT),通过辅酶(F420)作为电子载体再依次被还原为次甲基(=CH)、亚甲基(=CH)和甲基(-CH₃);在四氢甲酰喋呤 S-甲基转移酶(Mtr)的作用下,甲基被转移到巯基辅酶 M(HS-CoM)上;最后,由甲基辅酶 M 还原酶(Mcr)将其转化为 CH₄^[36]。研究表明 30% 的天然甲烷是通过氢营养型产甲烷菌的 CO₂ 还原途径产生,这意味着微生物介导的 CO₂ 甲烷化潜力巨大^[37]。

现阶段,在油藏环境中封存 CO₂ 并通过生物转化为 CH₄ 的技术的可行性已得到大量理论和试验验证^[38]。学者们通过培养和免培养的方法,在低温和高温油藏中发现了多种参与 CO₂ 转换为 CH₄ 生物过程的氢营养型产甲烷菌,并且基于功能基因对油藏微生物群落的代谢情况进行分析,证实了 CO₂ 转化为 CH₄ 途径的可能性^[2]。在油田现场试验中,Tyne 等^[39]对比了美国路易斯安那州一个注入 CO₂ 的油藏和其邻近未注入 CO₂ 的油藏中 CO₂ 的变化,结果显示微生物的产甲烷作用可以将 13%~19% 的 CO₂ 转化为 CH₄,在标准温度和压力条件下油藏原位微生物产甲烷速率为 73~109 mmol·m⁻³·a⁻¹。天然条件下的产甲烷菌对 CO₂ 的转换速率较慢,为了提高 CO₂ 甲烷化的经济效益,Xiong 等^[40]创新性地提出了以枯竭气藏为大型生化反应器来利用 CO₂ 生化合成天然气的技术构想(图 3)。工作流程如下:①向枯竭气藏注入

CO₂ 和 H₂(主要来源于含氢工业废气)等气体组成的混合气体及高活性的产甲烷菌;②关井等待产甲烷菌将绝大部分 CO₂ 和 H₂ 转换为 CH₄;③在适宜时机从枯竭气藏中开采以 CH₄ 为主要组分的再生天然气;④再生天然气产生的 CO₂ 被捕后用于下一阶段的生化转换。此外,油藏微生物还可以协同作用原油降解和 CO₂ 甲烷化,在提高石油采收率的同时封存 CO₂,达到“利用与封存一体,增产与减排双赢”的效果,这对实现双碳目标具有能源和环境的双重意义。

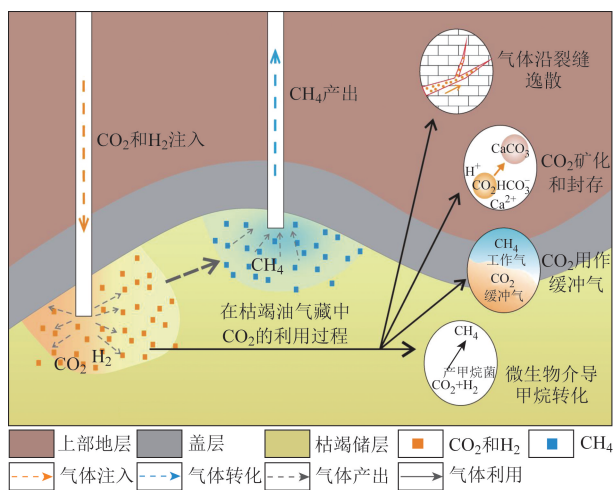


图 3 枯竭气藏 CO₂ 封存与生化合成天然气示意图

Fig. 3 Schematic diagram of CO₂ storage and using micro-organisms to convert CO₂ into natural gas in depleted gas reservoirs

3 结论与展望

3.1 结论

油藏微生物技术发展至今,已成为油田开发领域中一种重要的技术手段,具有经济成本低、环境友好等优点。油藏微生物在国内外提高石油采收率领域研究和应用规模较大,在多个国家的现场试验中取得良好的增油效果,而在石油污染修复和 CCUS 领域主要处在理论研究和室内实验阶段,尚未得到较大规模的现场应用。后续针对相关方面的问题继续开展深入研究,将进一步完善和拓展油藏微生物技术的应用范围。

3.2 展望

目前油藏微生物技术在油气开发、石油环境污染修复和 CO₂ 封存利用等关系国家安全与民生的重

要领域得到了一定程度的应用,这对促进我国能源结构调整,实现“双碳”目标,保障我国能源安全具有重要的科学和实践意义。然而,仍有许多关键科学问题有待解决。

(1) 相比于单一微生物,使用微生物群落往往具有更好的应用效果。油藏微生物间的相互作用决定了整个微生物群落的结构和功能。然而,目前在油藏微生物群落的应用过程中,还缺乏对功能菌群在实际现场中相互作用规律的认识。未来对油藏微生物之间的相互作用以及微生物群落与原油和岩石之间的相互作用进行深入研究是保障现场试验效果稳定的重要攻关方向。

(2) 油藏微生物群落在 CO₂ 封存和利用过程中能够发挥积极作用,但微生物的代谢产物和微生物形成的生物被膜容易封堵岩石孔隙,从而干扰 CO₂ 封存。此外,油藏中的某些微生物及其代谢产物会抑制 CO₂ 转化。因此,未来需要科学调控和运用油藏微生物群落,优化提高 CO₂ 地质封存效率和处置安全,最大限度地避免微生物群落的工程危害。

(3) 随着高通量测序技术的发展和采样范围的扩大,不少研究表明油藏中存在大量未知类群的微生物。基于微生物的基因组数据分析显示很大一部分未知类群的微生物在油藏中发挥着重要的生态学功能,特别是病毒。目前,对油藏中病毒的研究还处于初级阶段。研究发现病毒可以通过感染细菌或古菌等宿主,调控微生物群落的组成和功能。未来对未知类群的微生物进行深入挖掘与功能解析,以及对病毒与宿主的相互作用机制开展研究,可以为油藏微生物技术在油气开发、石油污染生物修复和 CO₂ 封存利用等多个领域的应用提供新的微生物资源与新思路。

参考文献(References):

- [1] Bar-On Y M, Phillips R, Milo R. The biomass distribution on Earth[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(25): 6506 – 6511.
- [2] Mu B Z, Nazina T N. Recent advances in petroleum microbiology[J]. Microorganisms, 2022, 10(9): 1706.
- [3] 李术艺, 冯旗, 董依然. 地质封存二氧化碳与深地微生物相互作用研究进展[J]. 微生物学报, 2021, 61(6): 1632 – 1649.
Li S Y, Feng Q, Dong Y R. Interactions between geological sequestration of carbon dioxide and deep subsurface microorganisms[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2021, 61(6): 1632 – 1649.
- [4] Jones D M, Head I M, Gray N D, et al. Crude – oil biodegradation via methanogenesis in subsurface petroleum reservoirs[J]. Nature, 2008, 451(7175): 176 – 180.
- [5] 代小丽, 王硕, 李佳斌, 等. 石油污染土壤原位生物修复强化技术研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(3): 456 – 466.
Dai X L, Wang S, Li J B, et al. Research progress on in situ bioremediation enhancement technology of oil contaminated soil[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10(3): 456 – 466.
- [6] Pannekens M, Kroll L, Müller H, et al. Oil reservoirs, an exceptional habitat for microorganisms[J]. New Biotechnology, 2019, 49: 1 – 9.
- [7] 王璐, 聂勇, 宋新民, 等. 油藏微生物及其压力适应机制[J]. 微生物学通报, 2016, 43(11): 2495 – 2505.
Wang L, Nie Y, Song X M, et al. Microbial community in petroleum reservoir and its pressure adaptation mechanisms[J]. Microbiology China, 2016, 43(11): 2495 – 2505.
- [8] Kost C, Patil K R, Friedman J, et al. Metabolic exchanges are ubiquitous in natural microbial communities[J]. Nature Microbiology, 2023, 8(12): 2244 – 2252.
- [9] Romdhane S, Spor A, Aubert J, et al. Unraveling negative biotic interactions determining soil microbial community assembly and functioning[J]. The ISME Journal, 2022, 16(1): 296 – 306.
- [10] Hao L H, Chi C Q, Luo N, et al. Application of “oil – phase” microbes to enhance oil recovery in extra heavy oil reservoir with high water – cut: A proof – of – concept study[J]. Petroleum Science and Technology, 2023, 41(6): 635 – 649.
- [11] Orphan V J, Taylor L T, Hafenbradl D, et al. Culture – dependent and culture – independent characterization of microbial assemblages associated with high – temperature petroleum reservoirs[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2000, 66(2): 700 – 711.
- [12] Jones D M, Head I M, Gray N D, et al. Crude – oil biodegradation via methanogenesis in subsurface petroleum reservoirs[J]. Nature, 2008, 451(7175): 176 – 180.
- [13] 王作乾, 范喆, 陈希, 等. 2022 年度全球油气开发现状、形势及启示[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(5): 1016 – 1031, 1040.
Wang Z Q, Fan Z, Chen X, et al. Global oil and gas development in 2022: situation, trend and enlightenment[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(5): 1016 – 1031, 1040.
- [14] Head I M, Gray N D. Microbial Biotechnology 2020; microbiology of fossil fuel resources[J]. Microbial Biotechnology, 2016, 9(5): 626 – 634.
- [15] Chen J, Liu Y F, Zhou L, et al. Long – chain n – alkane biodegradation coupling to methane production in an enriched culture from production water of a high – temperature oil reservoir[J]. AMB Express, 2020, 10(1): 63.
- [16] Arora P, Kshirsagar P R, Rana D P, et al. Hyperthermophilic Clostridium sp. N – 4 produced a glycoprotein biosurfactant that enhanced recovery of residual oil at 96 °C in lab studies[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2019, 182: 110372.

- [17] Zhang J H, Xue Q H, Gao H, et al. Production of lipopeptide biosurfactants by *Bacillus atrophaeus* 5-2a and their potential use in microbial enhanced oil recovery [J]. *Microbial Cell Factories*, 2016, 15(1):168.
- [18] 马挺, 陈瑜. 油藏微生物的代谢特征与提高原油采收率技术[J]. *微生物学杂志*, 2018, 38(3):1-8.
- Ma T, Chen Y. Metabolism characteristics of microorganisms in oil reservoir and microbial enhanced oil recovery [J]. *Journal of Microbiology*, 2018, 38(3):1-8.
- [19] Dong H, Zheng A Y, He Y L, et al. Optimization and characterization of biosurfactant produced by indigenous *Brevibacillus borstelensis* isolated from a low permeability reservoir for application in MEOR [J]. *RSC Advances*, 2022, 12(4):2036-2047.
- [20] Castorena-Cortés G, Zapata-Peñasco I, Roldán-Carrillo T, et al. Evaluation of indigenous anaerobic microorganisms from Mexican carbonate reservoirs with potential MEOR application [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, 81:86-93.
- [21] 刘骊川. 微生物驱油技术的研究进展与应用前景[J]. *中外能源*, 2009, 14(3):41-45.
- Liu L C. Advances in researching the techniques of microbial enhanced oil recovery and their application prospects [J]. *Sino-Global Energy*, 2009, 14(3):41-45.
- [22] Town K, Sheehy A J J, Govreau B R R. MEOR success in southern Saskatchewan [J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2010, 13(5):773-781.
- [23] 王笠洋, 吕振山. 吉林油田微生物采油技术的研究与应用[C]//“振兴吉林老工业基地——科技工作者的历史责任”吉林省第三届科学技术学术年会论文集(上册). 长春: 吉林大学出版社, 2004:6.
- Wang L F, Lv Z S. Research and application of microbial enhanced oil recovery technology in Jilin Oilfield [C]//Collected Papers of the 3rd Jilin Province Science and Technology Academic Annual Conference. Changchun: Jilin University Press, 2004:6.
- [24] 刘国安. 微生物采油: 花开又一枝——微生物采油技术为大港油田提高采收率助力 [N]. *中国石油报*, 2005-07-05(002).
- Liu G A. Microbial oil recovery: Another branch of blooming flowers [N]. *China Petroleum Daily*, 2005-07-05(002).
- [25] 侯兆伟, 李蔚, 乐建君, 等. 大庆油田微生物采油技术研究及应用[J]. *油气地质与采收率*, 2021, 28(2):10-17.
- Hou Z W, Li W, Le J J, et al. Research and application of microbial enhanced oil recovery technology in Daqing Oilfield [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2021, 28(2):10-17.
- [26] 汪卫东. 微生物采油技术研究进展与发展趋势[J]. *油气地质与采收率*, 2021, 28(2):1-9.
- Wang W D. Research advance and development trend in microbial enhanced oil recovery technology [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2021, 28(2):1-9.
- [27] 徐立志, 沈强. 新“特种兵”入列大庆油田增产技术方阵[J]. *中国科技纵横*, 2023(6):2.
- Xu L Z, Shen Q. The new “special forces” have been included in the production increase technology array of Daqing Oilfield [J]. *China Science & Technology Overview*, 2023(6):2.
- [28] 李瑞祥, 杨雪纯, 王艳芳, 等. 石油污染从微观修复到生态调控的生态学转变 [J/OL]. *环境科学*. (2023-12-05). <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202310166>.
- Li R X, Yang X C, Wang Y F, et al. Ecological transition from micro-remediation to ecological regulation of petroleum pollution [J/OL]. *Environmental Science*. (2023-12-05). <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202310166>.
- [29] Dellagnezze B M, de Sousa G V, Martins L L, et al. Bioremediation potential of microorganisms derived from petroleum reservoirs [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 89(1/2):191-200.
- [30] 胡梦杰, 钟磊, 蔡晓峰, 等. 微生物降解石油烃的代谢机制及研究进展 [J]. *环境工程*, 2023, 41(2):234-246.
- Hu M J, Zhong L, Cai X X, et al. Metabolic mechanism of microbial degradation of petroleum hydrocarbons and its research progress [J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41(2):234-246.
- [31] Cui J, Huang L, Wang W W, et al. Maximization of the petroleum biodegradation using a synthetic bacterial consortium based on minimal value algorithm [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2020, 15:104964.
- [32] 唐鸿志, 王伟伟, 张莉鸽, 等. 合成生物学在环境修复中的应用 [J]. *生物工程学报*, 2017, 33(3):506-515.
- Tang H Z, Wang W W, Zhang L G, et al. Application of synthetic biology in environmental remediation [J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2017, 33(3):506-515.
- [33] 胡书勇, 郭学强, 张佳轶, 等. 双碳愿景下 CCUS 提高油气采收率技术 [J]. *世界石油工业*, 2024, 31(1):81-91.
- Hu S Y, Guo X Q, Zhang J Y, et al. CCUS improves oil and gas recovery technology under the vision of carbon neutral and carbon peak [J]. *World Petroleum Industry*, 2024, 31(1):81-91.
- [34] Krevor S, de Coninck H, Gasda S E, et al. Subsurface carbon dioxide and hydrogen storage for a sustainable energy future [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4(2):102-118.
- [35] Mitchell A C, Phillips A J, Hamilton M A, et al. Resilience of planktonic and biofilm cultures to supercritical CO₂ [J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2008, 47(2):318-325.
- [36] 承磊, 郑珍珍, 王聪, 等. 产甲烷古菌研究进展 [J]. *微生物学通报*, 2016, 43(5):1143-1164.
- Cheng L, Zheng Z Z, Wang C, et al. Recent advances in methanogens [J]. *Microbiology China*, 2016, 43(5):1143-1164.
- [37] 魏小芳, 罗一菁, 刘可禹, 等. 油气藏埋存二氧化碳生物转化甲烷的机理和应用研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2011, 26(5):499-506.
- Wei X F, Luo Y J, Liu K Y, et al. Research progress on the mechanism and potential application of CH₄ bioconversion from CO₂ in oil and gas reservoirs [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(5):499-506.
- [38] 牛建杰, 刘琦, 彭勃. 油藏地质封存中 CO₂ 生物转化 CH₄ 的资源化利用技术研究现状 [J]. *现代化工*, 2020, 40(9):30-34, 40.
- Niu J J, Liu Q, Peng B. Research status of technology for obtaining

- methane by biotransformation of CO₂ geologically stored in oil reservoirs[J]. *Modern Chemical Industry*, 2020, 40 (9) : 30 – 34, 40.
- [39] Tyne R L, Barry P H, Lawson M, et al. Rapid microbial methanogenesis during CO₂ storage in hydrocarbon reservoirs[J]. *Nature*, 2021, 600(7890) : 670 – 674.
- [40] Xiong Y, Hou Z M, Xie H P, et al. Microbial – mediated CO₂ methanation and renewable natural gas storage in depleted petroleum reservoirs: a review of biogeochemical mechanism and perspective[J]. *Gondwana Research*, 2023, 122 : 184 – 198.

Application and prospects of reservoir micro – organisms in oil and gas development

LUO Na¹, MU Hongmei²

(1. *College of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China*; 2. *School of environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: Oil reservoirs are typical extreme environments characterized by high temperature, high pressure, high salinity and anaerobic, and the reservoir micro – organisms are important components. Research on reservoir micro – organisms is of great significance to hydrocarbon resource formation, biogeochemical cycling, and the life origins and evolution. Through literature reviews, the authors in this paper described interaction modes and primary functions of micro – organisms in the reservoir, and summarized mechanisms and advancements in the application of reservoir micro – organisms in enhancing oil recovery, bioremediation of oil pollution, and carbon capture, utilization and storage (CCUS), and identified key issues that need to be addressed in the utilization of reservoir micro – organisms. The reservoir micro – organisms have advantages of low – cost and environmentally friendly in oil and gas exploration and development and environment restoration, indicating promising application prospect. This study could provide references and insights for further research and application in this field.

Keywords: reservoir micro – organisms; petroleum geology; enhance oil recovery; carbon capture, utilization and storage; environmental restoration

(责任编辑: 魏昊明)