

采油微生物在微驱过程中的生长、运移及分布规律

柯从玉^{1,2,3*} 吴刚² 游靖² 谢刚² 李青² 王冠² 牟伯中³

(1. 西安石油大学 化学化工学院 陕西 西安 710065)

(2. 华北油田公司 采油工程研究院 河北 任丘 062552)

(3. 华东理工大学 化学与分子工程学院 上海 200237)

摘要:【目的】深入了解现场微生物驱油机理、效果评价标准及影响因素。【方法】结合现场微生物驱油过程产出液的跟踪监测及室内物模实验对微生物在地层中的生长繁殖、运移及分布规律进行研究。【结果】结果表明, 通过从水井注入的外源微生物在油藏中能够有效生长繁殖, 而且注入的营养液也能够激活内源微生物, 但由于地层渗透率及营养液浓度的影响, 产出液菌浓要比注入菌浓低 1-2 个数量级; 葡萄糖的快速降解以及地层对微生物的过滤及吸附作用使大量的微生物停留在近井地带, 仅有部分微生物能够从生产井采出, 而且其运移速度要比营养液慢。【结论】地层渗透率和产出液中营养物浓度是影响微生物数量及分布的两个关键因素, 现场微生物驱油产出液中的菌浓一般很难达到 10^6 个/mL 以上, 该研究结果对微生物驱油技术的发展和具有重要应用意义。

关键词: 微生物驱油, 现场应用, 物模实验, 微生物运移分布

The growth, migration and distribution law of microbes during microbial displacement oil

KE Cong-Yu^{1,2,3*} WU Gang² YOU Jing² XIE Gang² LI Qing²
WANG Guan² MU Bo-Zhong³

(1. College of Chemistry & Chemical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

(2. Production Technology Research Institute of Huabei Oilfield Company, Renqiu, Hebei 062552, China)

(3. State Key Laboratory of Bioreactor Engineering and Institute of Applied Chemistry, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51174092); 华北油田公司重大科技项目(No. 2011-HB-Z230)

*通讯作者: ✉ kecongyu@126.com

收稿日期: 2012-07-04; 接受日期: 2012-09-25

Abstract: [Objective] To understand the field of microbial oil displacement mechanism, evaluation standards and its influence factors. **[Methods]** The growth, migration and distribution law of microbes during microbial displacement oil were studied based on site tracing monitoring during field microbial displacement oil and the physical model experiment in laboratory. **[Results]** The results show that the exogenous microbes injected from water injection well can grow and reproduce well in oil reservoir, and the injected nutrient solution is also capable of activating indigenous microbes, but the microbes concentration in produced fluid is lower 1–2 orders of magnitude than injected microbes concentration due to the formation permeability and nutrient concentration. Because of the rapid glucose degradation and the microbes filtration and adsorption by formation, the amount of microbes stay near the wellbore and only part of them can be produced from the corresponding oil well. Moreover, the migration rate of microbes is slower than nutrition. **[Conclusion]** The formation permeability and the nutrient concentration of output liquid are the two key factors on microbial quantity. The microbes concentration in produced fluid is difficult to exceed 10^6 cells/mL on site. The results of the study have a great significance for the development and application of microbial displacement oil technology.

Keywords: Microbial displacement oil, Field application, Physical model experiment, Microbes migration and distribution

微生物采油技术是一项发展迅速、前景广阔的新型采油技术,它具有高科技、节能环保等一系列优点^[1-3]。利用微生物提高采收率主要有4种方式:(1)微生物吞吐增油^[4-5];(2)微生物调剖法^[6];(3)微生物清防蜡^[7-8];(4)微生物水驱增油^[9-11]。微生物单井吞吐技术具有低成本、低风险、高效益、易操作等先进特点,是目前现场应用最广泛的一种方式。然而由于该技术具有作用范围有限、见效时间短以及需要关井操作等缺点,现在逐渐发展了微生物水驱增油技术,现场通过将筛选的菌种和/或营养液从注水井注入,驱油微生物在地层中不断生长繁殖并随注入水一起向前运移,有益菌及代谢产物在移动过程中可以持续与油藏作用,该方式最大的优点是注入的微生物及营养液能够在地层中充分与原油作用,有效期长,而且适合于大规模的现场应用,但该技术仍处于试验阶段,国内已开展了20多个区块

的现场试验,但对于现场微生物驱油机理、影响因素及效果评价标准方面还缺乏统一的认识,发展方向仍不明确,至今难以推广,因此,微生物水驱增油机理及现场应用是目前研究的热点^[12]。

宝力格油田巴51断块为普通低温(38℃)稠油油藏,断块地面原油粘度自西向东由300 mPa·s渐变为2 000 mPa·s,原油粘度大,常规注水开发效果差,含水上升快,最终导致油田稳产和开发技术难度大。为了解决油田开发难的问题,油田公司于2009年开始在该断块实施微生物驱。通过实验在该断块渣油坑中分离培育出两株能够产脂肽生物表面活性剂和生物气的高效降粘菌种,前期吞吐实验表明注入的这两株菌在地层中能够很好地生长繁殖,施工20口油井,其中16口井见效明显,微生物吞吐前后原油平均降粘率为41.14%,累计增油2 336 t。根据微生物吞吐实验结果,油田公司于2010年7月开始在该断块开

展整体微生物驱,通过从注水井注入 1%菌液和 0.81%营养液段塞进行驱油,每阶段设计注入量为 0.07 PV,通过对产出液菌浓跟踪监测来对现场注入工艺方案进行动态调控。从 2010 年 7 月至 2012 年 4 月,在巴 51 断块全部 24 口注水井进行了 3 个轮次的微生物驱,结果地层中的微生物数量明显提高,普遍达到了 10^5 – 10^6 个/mL 左右,原油粘度下降 25.3%,但部分油井增油效果并不理想,由于在这方面还缺少相关经验,因此还有很多问题值得深入探索。

本研究通过对宝力格油田巴 51 断块现场大规模微生物驱油过程的跟踪监测及室内物模实验深入研究了采油微生物在微驱过程中的生长、运移及分布规律,为微生物驱油现场应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试剂和仪器

试剂:葡萄糖(天津市天大化工实验厂,分析纯),磷酸二氢钾(天津市津科精细研究所,分析纯),酵母膏及蛋白胨(北京奥博星生物技术有限公司,生化试剂),蕙酮(海信然原装生物试剂,分析纯),细胞溶解酶(Sigma 公司),其他试剂均为分析纯。

仪器:UV-754 紫外-可见分光光度计(上海欣茂),K9840 自动凯氏定氮仪(济南海能仪器有限公司),Agilent6890 气相色谱-质谱联用仪(美国安捷伦)。

1.2 培养基

室内评价及现场注入营养液配方(g/L):葡萄糖 4.0,氯化铵 1.0,酵母膏 0.5,磷酸二氢钾 0.1,尿素 2.5, pH 7.0。

1.3 注入菌

采用从宝力格油田现场废油坑中筛选出来两

株兼性厌氧高效采油菌(命名为 LC 和 JH),经 16S rDNA 序列分析鉴定为枯草芽孢杆菌和地衣芽孢杆菌,这两株菌的主要代谢产物为脂肽表面活性剂、有机酸以及生物气。注入菌液采用 LC:JH=1:1 (V/V)复配,菌浓为 2×10^8 个/mL。

1.4 现场微生物及营养液监测

(1) 常规监测:对宝力格油田巴 51 断块所有油井每隔一个月取样一次,通过平板计数法测定产出液中的微生物数量;分别采用蕙酮-硫酸分光光度法^[13],钼酸铵分光光度法(FHZHJSZ0039)及凯氏定氮法(GB/T 5009.5-2003)测定营养液中的组分葡萄糖、磷酸二氢钾及氮浓度变化。

(2) 精细监测:从开始注微生物开始选择 5 口有代表性的井组进行监测,监测周期为 1 周,对产出液中的菌浓及营养液不同组分浓度进行测定,方法同上。

1.5 微驱过程中菌浓监测及菌群变化分析

微驱过程中产出液菌浓监测采用平板计数法进行分析。菌群变化分析采用微生物分子学检测:油井采集水样→细菌离心富集→DNA 提取→16S rDNA PCR 扩增→变性梯度凝胶电泳(DGGE)分析→目标菌的确定→凝胶扫描定量分析。

1.6 人造岩心模拟微生物吸附及运移

岩心装填:采用 80、120 和 200 目石英砂按照一定比例混合分别装填 6 根直径 2.5 cm,长度 50 cm 的岩心,岩心参数见表 1。

实验步骤:(1)装填岩心,抽真空后饱和地层水;(2)测岩心孔隙度、渗透率;(3)饱和原油,出口设置背压阀,岩心加压至 10 MPa 并全程保持;(4)用地层水一次水驱,待岩心出口含水率达 100%时停止水驱;(5)注微生物,之后继续水驱;(6)在不同时间取样进行微生物总数的测定。实验所注微生物为 LC:GH=1:1 (V/V),注入速度为 0.2 mL/min,实验温度为 45 °C。

表 1 实验岩心参数
Table 1 Parameters of testing cores

	孔隙体积 Pore volume (mL)	孔隙度 Porosity (%)	渗透率 Permeability (μm^2)	石英砂混合比例 The mixture ratio of quartz sand (80:120:200 mesh)
1 [#]	69.1	21.0	0.485	5:4:1
2 [#]	68.4	20.5	0.468	5:4:1
3 [#]	67.2	20.1	0.455	5:4:1
4 [#]	62.5	18.9	0.145	6:3:1
5 [#]	72.8	22.1	0.984	2:2:1
6 [#]	78.5	23.9	1.500	1:2:3

渗透率和孔隙度的测定: 采用机械装填完毕后对岩心管抽真空 6 h, 同时向岩心饱和地层水。最后根据进入岩心管中地层水的总体积及进出口的压差来计算孔隙度 Φ 和渗透率 Q , 具体参数见表 1。其计算公式分别如下:

$$\Phi = \frac{PV}{V_T} \times 100\%,$$

$$Q = K \cdot \frac{60A}{\mu_w L} \cdot \Delta p, \quad K = \frac{\mu_w L}{60A} \cdot k。$$

2 结果与讨论

2.1 现场微生物驱产出液总菌浓的监测

为了详细了解微生物在地层中的生长繁殖及微驱过程中的变化规律, 现场对微驱产出液中菌浓变化进行了详细跟踪监测, 结果见图 1。从图 1 中可以明显看出, 经过第一轮次的微生物注入后, 产出液中的菌浓由不到 10^4 个/mL 增加到 10^5 个/mL 以上, 而且能够维持 5 个月左右, 为了

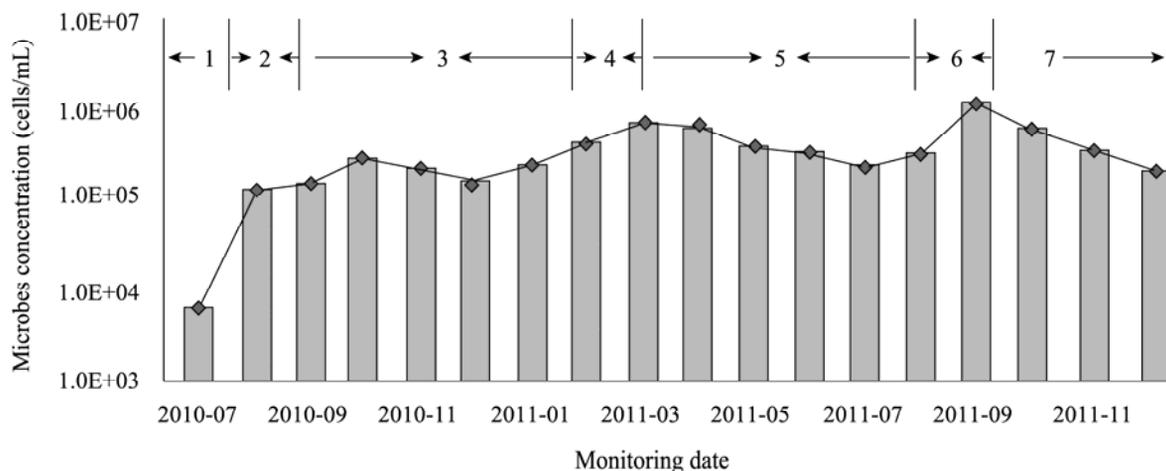


图 1 微驱过程中菌浓的变化曲线

Fig. 1 The concentration curve of the microbes in microbial displacement process

注: 1、3、5、7: 水驱; 2、4、6: 注入微生物及营养液。

Note: 1, 3, 5 and 7: The water flooding; 2, 4 and 6: Injected microbes and nutrient solution.

继续增加地层中的微生物数量, 又分别在2011年的2月和2011年8月进行了两轮次的微生物及营养液补充注入, 3次累计注入量达到了87 600 m³。室内实验及现场吞吐实验表明, 当从注水井连续注入高浓度的菌液和营养液时, 在注水井近井地带的微生物数量很快就能达到10⁸个/mL以上, 而且现场每轮次微生物的注入时间都在30–45 d左右, 理论上产出液中的菌浓应该能够达到10⁸个/mL以上, 然而现场监测数据却表明, 即使从注水井注入再多的菌液和营养液, 产出液中的菌浓也很难达到10⁶个/mL以上, 原因有待进一步研究。

2.2 微生物驱过程中目标菌的监测

注入的目标菌能否在地层中有效繁殖及运移是微驱过程中最关心的问题, 因此现场对微驱过程中产出液中注入的目标菌进行了检测, 见图2, 变性梯度凝胶电泳(DGGE)分析表明, 注入的目标菌LC和JH在地层中能够有效地生长繁殖, 并且能够穿过地层达到生产井, 然而通过电泳条带

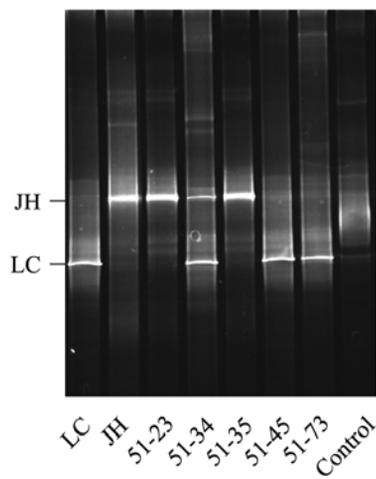


图2 产出液DGGE分析

Fig. 2 The DGGE analysis of produced fluid

注: LC和JH为注入的目标菌; 51-23, 51-34, 51-35, 51-45和51-73为产出液的混合菌。

Note: LC and JH represent the injected target microbes; the 51-23, 51-34, 51-35, 51-45 and 51-73 represent the mixed microbes in production fluid.

扫描并定量分析发现, 虽然产出液中监测到了目标菌, 但在数量上要远低于注入菌数量(低1–2个数量级), 表明油藏对微生物具有较强的吸附和过滤作用, 仅有部分目标菌能够顺利运移到生产井。

2.3 微生物在地层中的运移速度

室内试验及现场分析发现, 磷酸根在地层中的吸附很小, 其运移速度与示踪剂非常接近, 因此现场以磷酸根的运移速度作为参照就可以了解微生物运移的快慢, 图3为5口井监测的平均结果。从图3中可以看出, 该断块从2011年8月9日开始注1%菌液+0.81%营养液, 在监测的第24天从生产井观察到磷酸根浓度开始上升, 到2011年9月23日浓度达到最大值, 而微生物数量的变化却远滞后于磷酸根, 菌浓在微驱后第50天才开始明显升高, 在第60天左右达到最大值, 该结论表明地层对微生物具有较强的吸附作用。

另外通过监测微驱过程中的营养液浓度变化发现, 在整个微驱过程中都未检测到葡萄糖, 这表明葡萄糖在地层中降解很快而根本到达不了生产井。10 m岩心物模实验表明, 葡萄糖在岩心中有相对较强的吸附作用, 更重要的是葡萄糖一般经过12 d左右就完全被降解成有机酸, 而现场驱油过程中, 葡萄糖从注水井到对应油井需要一个月以上的运移时间, 因此现场很难通过加大葡萄糖的浓度来提高产出液中的菌浓。虽然在产出液中检测到了氮源和磷源浓度的变化, 但产出液中这两种物质的最高浓度也只有注入浓度的1/10左右, 实验将产出液污水在地层温度下摇床培养一周以上发现菌浓仍然没有明显增加, 但在加入少量营养液后(即使0.1%的营养液)菌浓很快就增殖到10⁸个/mL以上, 同时营养浓度对微生物代谢产物也有很大影响, 当营养液浓度由1%降低到0.1%时目标菌的产气量降低了8倍, 发酵液表面张力增加了20%以上, 该结论充分说明产出液

中营养液浓度太低是影响菌浓进一步提高及微驱效果不理想的一个重要原因。从现场微驱过程分析看,显然注水井附近的菌浓很高,然而在产出液中的菌浓却要低很多,导致微生物这种分布的原因有待进一步研究。

2.4 室内物理模拟微生物在地层中的生长繁殖及运移分布

图4为不同注入方式下岩心出口端微生物数量的变换曲线。在模拟地层渗透率条件下,实验发现无论采取那一种方式,在出口端的菌浓都要

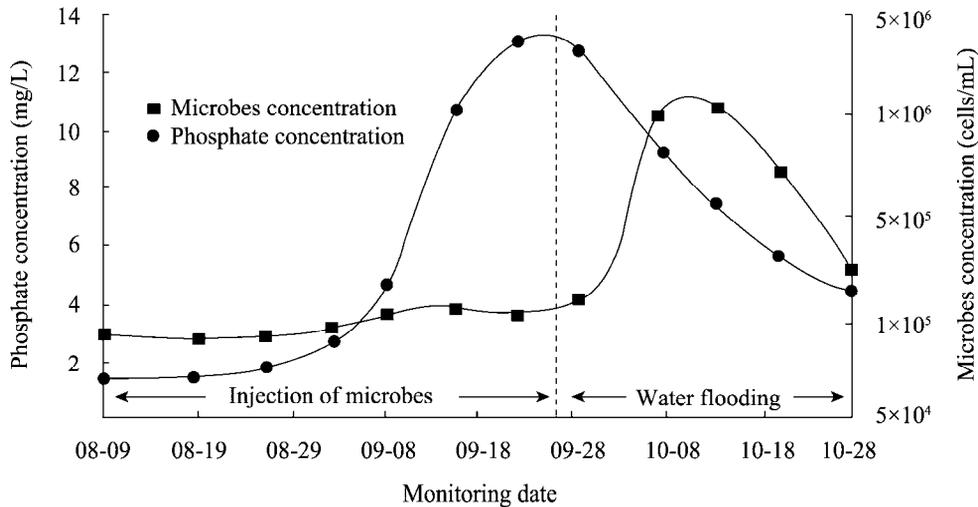


图3 微驱过程中菌浓和磷酸根浓度的变化情况

Fig. 3 The concentration changes of microbes and phosphate in microbial displacement process

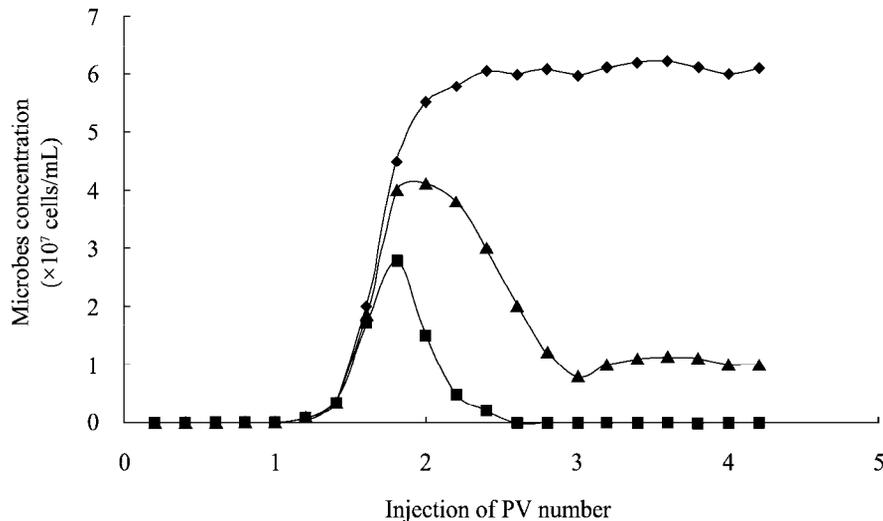


图4 微生物数量在物模驱油过程中的变化情况

Fig. 4 The quantity changes of microbes in physical simulation flooding process

注: ◆: 营养液+菌液连续驱; ▲: 注0.5 PV的菌液段塞+营养液驱; ■: 注入0.5 PV的菌液段塞+水驱。

Note: ◆: Nutrients solution+Bacteria liquid displacement; ▲: 0.5 PV block of bacteria liquid+Nutrients solution displacement; ■: 0.5 PV block of bacteria liquid+Water flooding.

比注入菌浓低 1-2 个数量级, 即使连续注入高浓度的菌液和营养液, 在出口端产出液中的菌浓也达不到注入浓度, 而且微生物运移的速度比营养液要慢, 该结论与现场监测结果一致。将实验结束后的岩心打开分析发现岩心空隙中存在大量滞留的微生物, 从数量分布来看越靠近注入端微生物数量越多, 该结论也进一步说明岩心对微生物具有较强的吸附和过滤作用, 这也是在现场产出液中仅能检测到部分注入菌的原因。在其他条件完全相同的条件下, 当岩心渗透率由 $0.145 \mu\text{m}^2$ 增加到 $1.500 \mu\text{m}^2$ 时, 岩心出口端的菌浓也由 6×10^5 个/mL 增加到 5×10^8 个/mL, 说明岩心渗透率是影响微生物运移的一个重要因素。

通过现场监测结果并结合室内物模实验可以得出现场微驱过程中微生物在不同时间及不同位置的分布情况, 见图 5。

假设微生物及营养液段塞注入时间为 30 d, 油水井距离 250 m。在微驱前, 地层中原有的菌浓为 10^5 个/mL 左右, 当微驱开始后, 随着目标菌及营养液的连续注入, 由于在近井地带注入的营养液富含微生物所需要的营养及氧气, 此时

目标菌及内源菌开始迅速增殖, 微生物的生长曲线类似于室内摇瓶培养, 并在 2-3 d 内达到 10^8 个/mL 以上, 而且只要井口注入的营养液不停止, 近井地带的微生物数量就会一直维持着较高的数量。由于注入的营养液在向前运移的过程中被快速消耗、吸附, 营养物浓度越来越低, 而近井地带高浓度的微生物由于自身疏水性及地层孔喉对细菌的排阻效应使其不能顺利随营养液一起向前快速运移, 从而导致菌浓随距离注入井越远其数量越低。地层对微生物的吸附和排阻效应使得微生物运移的速度较流体前沿慢, 因此在油井产出液中观察到菌浓的变化具有明显的滞后性。现场监测发现, 微生物从注水井到生产井一般需要 45 d 以上, 比磷酸根要滞后半个月以上。当微驱结束后, 在水驱作用下, 由于注水井附近营养液浓度的迅速降低, 而对应油井附近营养物浓度本来就不高, 因此整个油藏中的微生物数量开始下降。

3 结论

在采用注入外源微生物采油过程中, 首先, 由

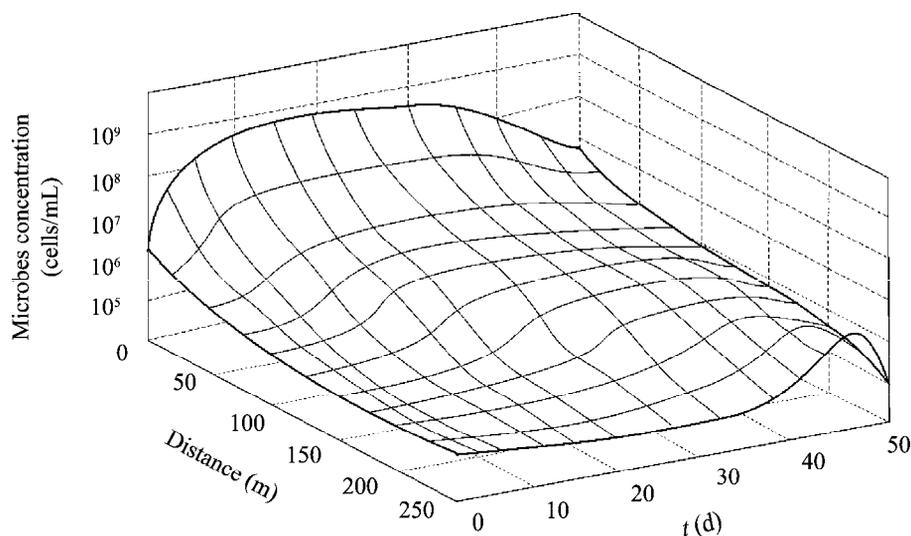


图 5 微生物数量在地层中随微驱过程中的变化及分布

Fig. 5 The quantity changes and distribution of microbes during MEOR

于地层对微生物的吸附及过滤作用,大部分微生物很难运移到地层深处,注水井附近的微生物数量要远大于对应油井产出液中微生物的数量。而且相对于注入的营养液组分,微生物在地层中的运移速具有一定的滞后性。其次,由于注入的营养液在运移的过程中消耗较快,尤其是注入的葡萄糖在地层中很快被微生物降解,因此在靠近油井端的微生物由于缺乏营养而很难得到有效的生长繁殖。最后,微驱过程中产出液中的菌浓与营养液在地层中运移的时间、浓度及地层渗透率有关,在地层中没有形成优势通道的情况下,产出液中的菌浓一般很难达到 10^6 个/mL 以上,而这种现象无法通过增加菌液和营养液的注入量来得到改善,这与传统的单井吞吐有很大区别。

参 考 文 献

- [1] Li J, Liu JS, Trefry MG, et al. Interactions of microbial enhanced oil recovery processes[J]. *Transport in Porous Media*, 2011, 87(1): 77-104.
- [2] Nerurkar AS, Suthar HG, Desai AJ. Biosystem development for microbial enhanced oil recovery (MEOR)[J]. *Microorganisms in Sustainable Agriculture and Biotechnology*, 2012(2): 711-737.
- [3] Brown LR. Microbial enhanced oil recovery (MEOR)[J]. *Current Opinion in Microbiology*, 2010, 13(3): 316-320.
- [4] 杨凌, 王世建. 川北油田微生物吞吐采油技术研究[J]. 内蒙古石油化工, 2009, 34(6): 45-49.
- [5] 汪卫东, 魏斌, 谭云贤, 等. 微生物采油需要进一步解决的问题[J]. *石油勘探与开发*, 2004, 31(6): 152-156.
- [6] 翁天波. 油井微生物调剖堵水方法: 中国, CN101131075[P]. 2008.
- [7] 徐卫华, 雷光伦, 薛芸, 等. 微生物防蜡作用机理研究[J]. *西南石油学院学报*, 2005, 27(6): 68-72.
- [8] 徐卫华, 雷光伦, 张忠智, 等. 微生物生长吸附规律及防蜡机理实验研究[J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 2005, 29(1): 65-69.
- [9] Maharaj U, May M, Imbert MP. Microbial enhanced oil recovery[J]. *Developments in Petroleum Science*, 1989, 22(17): 423-450.
- [10] Alireza1 SA, Shahab AS, Hassan M, et al. The in situ microbial enhanced oil recovery in fractured porous media[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007, 58(1/2): 161-172.
- [11] 程昌茹, 张淑琴, 闫云贵, 等. 微生物驱油注入技术研究与应用[J]. *石油钻采工艺*, 2006, 28(6): 46-50.
- [12] 汪卫东. 微生物采油技术研究及试验[J]. *石油钻采工艺*, 2012, 34(1): 107-113
- [13] 李利军, 孔红星, 陆丹梅. 蒽酮-硫酸法快速测定蔗糖的研究及应用[J]. *食品工业科技*, 2003, 24(10): 52-58.