

文章编号: 0253-2697(2021)01-0056-08 DOI:10. 7623/syxb202101005

关于油田寿命的思考

孙龙德^{1,2} 江同文³ 王凤兰^{1,2} 伍晓林^{1,2} 罗 凯⁴ 江 航⁵ 韩培慧^{1,2}

(1. 国家能源陆相砂岩老油田持续开采研发中心 黑龙江大庆 163712; 2. 大庆油田有限责任公司 黑龙江大庆 163002;
3. 中国石油勘探与生产公司 北京 100724; 4. 中国石油天然气集团有限公司科技管理部 北京 100724; 5. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083)

摘要: 一个油气藏从油气生成到消亡的进程,与其所经历的地质历史、地质作用和人工开采因素有关。人工开采加快油气藏消亡的进程,开发方式和技术手段不同会影响油田的开发生命周期。通过不断创新应用方法和技术,增加地质储量和可采储量,可有效延长油田的开发生命周期。根据大庆油田萨北开发区不同开发阶段的特点和矛盾,以提高油田采出程度为主线,论述了以早期注水、分层开采、加密调整为主的二次采油技术和以聚合物驱、三元复合驱为主的三次采油技术以及以自适应驱油体系为主的化学驱后四次采油技术对延长萨北开发区开发生命周期的开发实践。未来勘探开发技术水平的不断提高,将增加油田地质储量和可采储量,基于翁氏预测模型和偏正态分布数学模型,预计萨北开发区可以开采至 2110 年以后。

关键词: 大庆油田;油田寿命;油气藏成藏、破坏和消亡;一次采油;二次采油;三次采油;四次采油

中图分类号: TE355

文献标识码: A

Thoughts on the development life of oilfield

Sun Longde^{1,2} Jiang Tongwen³ Wang Fenglan^{1,2} Wu Xiaolin^{1,2} Luo Kai⁴ Jiang Hang⁵ Han Peihui^{1,2}

(1. Research and Development Center for the Sustainable Development of Continental Sandstone Mature Oilfield by National Energy Administration, Heilongjiang Daqing 163712, China; 2. Daqing Oilfield Company Limited, Heilongjiang Daqing 163002, China; 3. PetroChina Exploration & Production Company, Beijing 100724, China; 4. CNPC Science and Technology Management Department, Beijing 100724, China; 5. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China)

Abstract: The process from hydrocarbon generation to extinction for an oil-gas reservoir is related with its geological history, geological processes and artificial development. Artificial development will speed up oil and gas depletion; the development life of oilfields is influenced by diverse exploitation methods and technologies, and can be effectively extended by the constant innovation and application of new methods and technologies, and the increase in geological and recoverable reserves. This paper discusses the actual exploitation according to the characteristics and contradictions at different recovery stages in Sabei development zone in Daqing Oilfield, focusing on enhancing the recovery percentage of oil reserves. Specifically, the following oil recovery techniques are applied: secondary recovery dominated by early water-injection, separate zone production and infilling adjustments, tertiary recovery dominated by polymer flooding and alkali/surfactant/polymer (ASP) flooding, and quaternary recovery after chemical flooding dominated by self-adapting recovery system. With the increasing improvement in the exploration and development technologies in future, geological and recoverable reserves will be increased. Based on Weng's prediction model and the mathematical model of skewed normal distribution, it is estimated that the development life of the Sabei development zone can be extended beyond 2110.

Key words: Daqing oilfield; oilfield development life; oil and gas accumulation, destruction and extinction; primary recovery; secondary recovery; tertiary recovery; quaternary recovery

引用: 孙龙德,江同文,王凤兰,伍晓林,罗凯,江航,韩培慧. 关于油田寿命的思考[J]. 石油学报, 2021, 42(1): 56-63.

Cite: SUN Longde, JIANG Tongwen, WANG Fenglan, WU Xiaolin, LUO Kai, JIANG Hang, HAN Peihui. Thoughts on the development life of oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(1): 56-63.

油气自生成至运移、成藏和后期保存的过程中,受剥蚀、断裂等多种地质作用的影响,经历调整、破坏,甚至消亡,从时间域上看,这是一个连续性和阶段性辩证

统一的动态过程^[1]。油气藏寿命是指一个油气藏自其形成后能够存在的时间。根据是否投入开发,油气藏寿命分为自然寿命和生存寿命。自然寿命是指油气藏

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05052, 2011ZX05010)资助。

第一作者: 孙龙德,男,1962 年 3 月生,1983 年获华东石油学院学士学位,2000 年获中国科学院地质学专业博士学位,现为中国石油大庆油田有限责任公司教授级高级工程师、中国工程院院士,主要从事油气田开发与石油地质方面的研究。Email: sld@petrochina.com.cn

通信作者: 韩培慧,男,1963 年 4 月生,1998 年获大庆石油学院学士学位,2009 年获中国地质大学(北京)博士学位,现为大庆油田勘探开发研究院企业首席技术专家、教授级高级工程师,主要从事聚合物驱和化学驱后油层提高采收率技术研究工作。Email: hanph@petrochina.com.cn

形成直到油气自然散失殆尽的历史,而生存寿命则是指油气藏形成之后,由人工开发直至废弃的历史过程,包括开发阶段和残留阶段。油田寿命周期主要包括 3 种类型:①纯自然消亡过程,由于没有人类作用的影响,该过程十分漫长,可长达百万年、千万年甚至上亿年;②初期自然消亡、后期人工开发直到结束,由于人工开发加快了油藏消亡的过程,该类油藏消亡过程表现为前期较漫长、后期相对短暂,但整体周期依然较长;③完整保存的油藏由人工开发直至结束,由于勘探开发技术水平不断提升,该类消亡周期至少可达 100 年以上^[2-6]。通常所说的油田寿命是指油田自投入开发至无开采价值而废弃的年限,即油田开发生命周期。油气成藏是地质事件,而开发过程是短期的人类行为^[7-9]。人工开发加快油气藏消亡的进程,开发所采用的方式和技术手段不同,油田的开发生命周期也不同^[10-14]。笔者以大庆油田萨北开发区为例,阐述了油气藏从油气生成到消亡所经历的过程,分析了影响油气藏寿命的主控因素,论述了延长油田寿命的开发实践,并对进一步延长油田寿命进行了探索。

1 油气藏从生成到消亡的认识

油气藏从油气生成到消亡的过程包括建设、稳定和破坏 3 个阶段^[15]。油气从生成、初次运移到聚集但尚未达到平衡形成稳定的油气藏之前,是在油气系统自身的内动力(浮力)的作用下发生自然运移和动态聚集,这个过程为油气藏的建设阶段。只有当圈闭内的油、气、水达到相对平衡时才形成经典的油气藏,这个相对平衡状态的持续过程为油气藏的稳定阶段。油气藏的形成并不是成藏演化过程的终点和结束,按照事物发展的普遍规律,随着时间的推移油气藏必然会消亡,油气聚集量也会随着外界条件的改变而发生变化,最后只有少量的油气残留地下,这个过程为油气藏的破坏阶段^[16](图 1)。

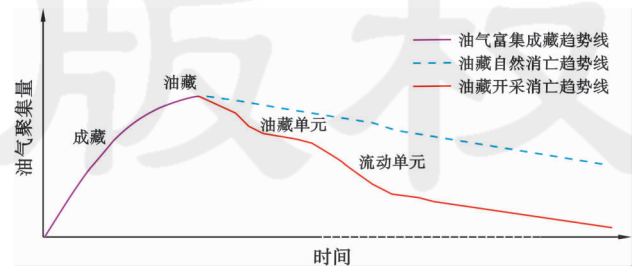


图 1 油气聚集量与时间的关系

Fig. 1 Relationship between petroleum accumulation and time

一个油气藏的寿命与其经历的多种地质作用和人工开发直接相关。油气聚集成藏后历经了剥蚀、断裂、

热蚀变、生物降解、氧化、水动力和水洗、渗漏和扩散等多种地质作用的破坏,以构造活动改造最为强烈,往往导致圈闭条件(如溢出点)的改变,破坏油气藏内的油、气、水动态平衡条件,造成油气在新圈闭条件下的再聚集成藏。国内外学者对油气藏的自然寿命进行了推测,Miller 等^[17]基于全球油藏储量时代分布和中值年龄研究,推测最小破坏速率为 $114 \times 10^4 \text{ t/a}$,认为油藏的平均寿命为 41 Ma;Macgregor^[18]统计了全球 350 个大油田的成藏和开发历史,发现其中 50%的油田是 35 Ma 之前形成的,推测油藏平均寿命为 55 Ma;李明诚等^[16]研究表明,一个大、中型油藏若仅受微渗漏和分子扩散的影响,自然寿命平均为 120 Ma。塔里木盆地塔东 2 寒武系古油藏和贵州麻江寒武系古油藏是最为典型的油藏自然消亡实例。塔东 2 寒武系古油藏的下寒武统烃源岩在加里东中期(460 Ma)生烃,于加里东晚期(420 Ma)在塔东 2 构造聚集成藏,随着埋藏深度逐渐增加,在晚海西期—印支期(250 Ma),原油开始裂解,塔东 2 油藏遭生物降解破坏。贵州麻江寒武系古油藏的寒武系烃源岩于加里东期(430 Ma)开始生烃,到海西期(250 Ma)大量生油并聚集成藏,印支期(220 Ma)原油开始裂解,燕山期(120 Ma)油气藏因构造抬升遭受大规模破坏,直至自然消亡^[19]。因此,塔东 2 寒武系古油藏和麻江寒武系古油藏的自然寿命均为 210 Ma。

人工开发影响油气藏消亡的进程,开发方式(一次采油、二次采油、三次采油和四次采油)和技术手段的不同,油田开发生命周期也不同。随着开发技术的进步、创新和发展,油藏残余油饱和度逐渐降低,经济极限含水率逐渐提高,可采储量也逐渐增加,能够有效延长开发生命周期。美国最大油田之一的东德克萨斯油田发现于 1930 年,针对不同的含水阶段采用不同的水驱和化学驱技术来延长油田的开发期限。含水率 $< 60\%$,边外注水,控制采油速度;含水率为 $60\% \sim 90\%$,井网加密,强采强注;含水率 $> 90\%$,水平井注采,水驱转化学驱。通过不同技术的选择性应用,东德克萨斯油田预计将开发到 2030 年^[20]。发现于 1943 年的罗马什金油田,是世界十大油田之一,通过实施 4 个开发规划,不断创新应用方法和技术,增加了油气地质储量,改进开发水平,增加了可采储量,保持了 20 年油田综合含水 87% 以下,有效延长了油田开发生命周期^[2]。在整个开发过程中,储量增长在很大程度上弥补了原油产量的下降。在最高产量期间,储量增长率超过了 80% ,在新增储量中,勘探新增储量约占 56% ,开发技术进步降低技术经济界限对新增储量贡献约为 44% 。罗马什金油田第 1 个开发规划实施阶段,动用

地质储量占总地质储量的 52.0%，采出程度近 38.0%；第 2 个开发规划实施后，动用总地质储量的 78.0%，采出程度约为 42.0%；第 3 个开发规划落实后，动用总地质储量的 90.0%，采出程度约为 49.0%；第 4 个开发规划主要依靠二次采油、三次采油和油田开发后期的四次采油提高油田采收率，预计采出程度达到 52.8%。通过 4 个开发规划的实施，可使油田稳定开采期延长至 2032 年，考虑到当地未来税收政策的支持力度，原油开采期将延长至 2065 年(图 2)。若未来采用提高采收率手段可进一步降低油田开发的技术经济界限、增加可采储量，罗马什金油田的开发生命周期将持续 150~200 年(图 3)。

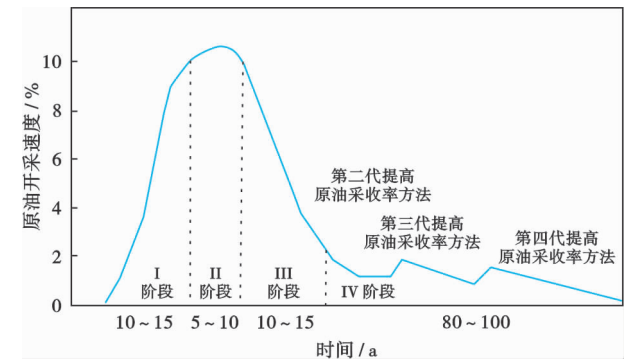
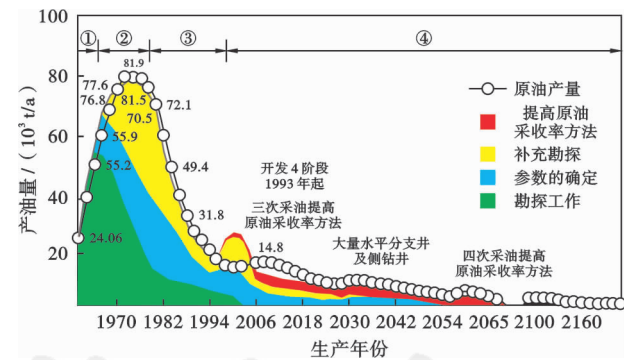


图 2 油田开发晚期新概念^[2]

Fig. 2 A new concept of late oilfield development stage



注：①—开发 I 阶段（1948—1968 年）；②—开发 II 阶段（1968—1975 年）；③—开发 III 阶段（1975—1993 年）；④—开发 IV 阶段（1993 年至今）。

图 3 罗马什金油田原油储量开采动态及增长^[2]

Fig. 3 Exploitation dynamics and growth of crude oil reserve in Romashkinskoye Oilfield

2 油气藏自然变化的观察

现在发现的油气藏只是其生命过程中的一个阶段^[15]。一个油气藏从形成到消亡，始终处于动态变化之中，处于不同成藏阶段的油气藏，其油藏能量、含油气饱和度也不同。处于建设阶段的油气藏表现为低

压、低油气饱和度和油气水界面不统一；处于稳定阶段的油气藏表现为常压—超高压、低—高油气饱和度和统一的油气水界面；处于破坏阶段的油藏往往调整重新成藏，常出现多个油气水界面，油气藏表现为常压—超高压、中—高油气饱和度。

塔中 4 油田为形成于约 200 Ma 前的具有统一油水界面的大型构造油藏，成藏发展后期受断裂和构造活动的影响，油藏动力失衡、遭受破坏，原油沿断层向上运移，油水界面由 2 610 m 向上抬升至 2 510 m，形成高度约为 100 m 的古过渡带。成藏破坏阶段形成了 5 个油水界面，分别为 2 610 m、2 581 m、2 527 m、2 521 m 和 2 510 m，油藏含油饱和度也具有非均质性，其中油藏下部含油饱和度为 36%，上部含油饱和度为 22.0%^[21-22](图 4)。模拟实验表明^[23]，距今约 55 Ma 油藏含油饱和度达到 80%，但受断裂活动的影响油气沿断裂向上运移，原始油藏含油饱和度逐渐降低，目前油藏底部含油饱和度已降至 20.0%。岩心驱替实验表明，注天然气能够与古过渡带残余油一次接触混相，可大幅降低残余油饱和度(由 24.7%降至 2.1%)，实现残余油的有效动用。上述研究表明，一个油田无论自然消亡，还是人工开发，含油饱和度都逐步降低，甚至降至 2%，这一发现为油田进一步增加可采储量、延长开发期限提供了理论依据，对油田生命周期研究具有重要的指导意义。

3 油田开发实践

油田开发一般会经历一次采油、二次采油、三次采油和四次采油 4 个阶段。笔者以大庆油田萨北开发区为例，剖析了不同开发阶段的开发方式对油田开发生命周期的影响。萨北开发区位于大庆长垣萨尔图构造的北部短轴背斜构造，为背斜型砂岩油藏，无气顶。开发区发育萨尔图、葡萄花和高台子 3 套油层共 118 个沉积单元，属于河流—三角洲沉积，岩性以细砂岩、粉—细砂岩和泥质粉砂岩为主；原油黏度高、含蜡量高、凝固点高、含硫量低；地质储量为 6.1290×10^8 t，其中一类油层 1.5221×10^8 t，二类油层 2.9133×10^8 t，三类油层 1.6936×10^8 t。

3.1 一次采油

利用油藏本身固有天然能量的释放开采石油的方法称为一次采油，如溶解气驱、天然水驱、气顶能量驱、弹性能量驱和重力驱。20 世纪 60 年代中国发现的大油田大部分都是陆相油田，气油比低，一次采油的采收率也比较低，因此很多油田没有经历过一次采油。大庆萨尔图油田原始气油比低，无底水，边水不活跃^[23]。1960—1966 年开展的一次采油试验表明，地层压力下

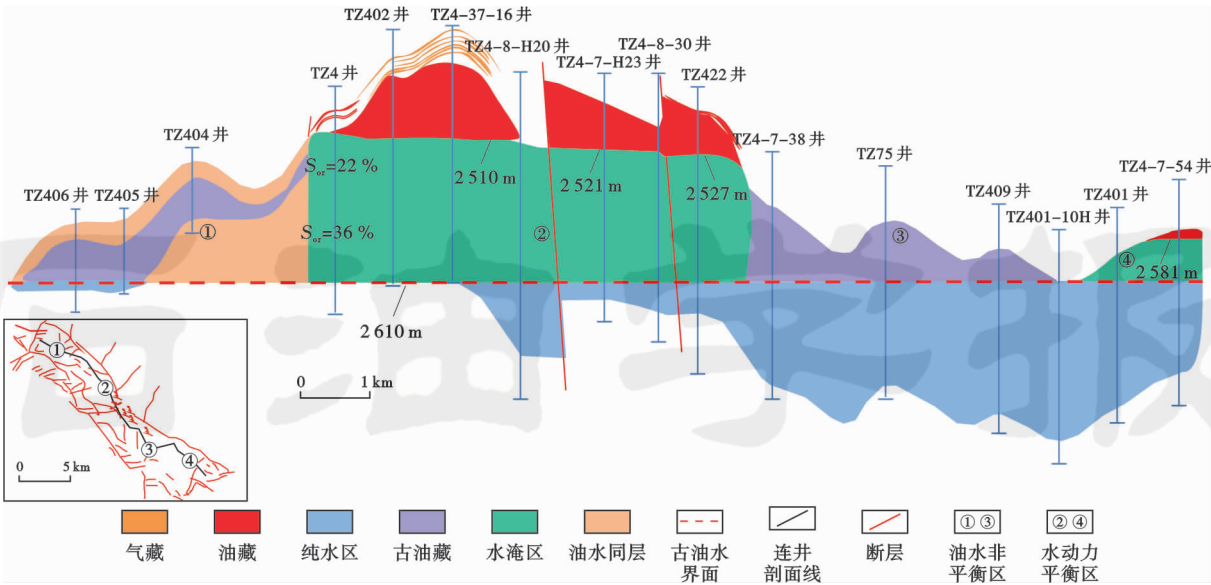


图 4 塔中 4 油田 CⅢ油组油藏剖面
Fig. 4 Reservoir profile of oil layer CⅢ in Tazhong 4 oilfield

降 4.12 MPa、低于饱和压力 2.00 MPa 时,依靠弹性能量和溶解气驱能量仅能采出地质储量的 9%^[24]。由此可见,一次采油油田开发生命周期短暂,不能保证油田较长时间的有效开发。

3.2 二次采油

一次采油不断消耗油藏能量,当依靠天然能量采油已不具经济价值或无法保持一定的采油速度时,人工向油藏注水或注气补充地层能量以增加采油量,这种方法称为二次采油。萨北开发区二次采油主要采取人工注水的开发方式,大体可划分为快速上产开发阶段、原油 500×10⁴t 以上高产稳产阶段和原油 400×10⁴t 稳产阶段 3 个开发阶段。

(1) 快速上产开发阶段(1963—1971 年)

国内外油田开发实践表明,天然能量不足的油田不适合采取“先天然能量开采、后注水(气)开采”的开发模式。因此,在开发初期,萨北开发区对萨尔图和葡萄花油层制定了早期内部切割注水保持压力、水井笼统注水、油井自喷开采的开发方式,形成了以“六分四清”为主要内涵的分层注采技术^[23-24]。1971 年产量上升到 457.9×10⁴t,综合含水为 8.50%,采出程度为 2.74%。

(2) 原油 500×10⁴t 以上高产稳产阶段(1972—2002 年)

针对油田开发过程中的平面层间矛盾突出、油层动用不均衡、中—低渗透油层以及薄差油层动用较差等问题,通过层系细分、井网加密^[24-27]、钢丝测调分层注水工艺^[28]、选择性射孔和压裂完井等采油工艺配套技术,提高了中—低渗透油层和薄差油层的动用程度,实现了产量的接替,有力支撑了萨北开发区原油 500×

10⁴t 以上高产稳产 31 年,1984 年原油产量达到最高峰为 830.40×10⁴t。该阶段末期综合含水为 92.22%,产油量为 326.37×10⁴t/a,采出程度为 34.22%。

(3) 原油 400×10⁴t 稳产阶段(2003—2014 年)

油田进入特高含水期后,针对剩余油高度分散、油田接替储量匮乏等问题,通过实施层系重组、井震结合断层区注采系统调整和水驱精细挖潜,各类油层的水驱控制程度及动用程度进一步提高,有力支撑了萨北开发区原油 400×10⁴t 持续稳产 12 年。该阶段末期综合含水为 94.63%,原油产量为 160.11×10⁴t/a,采出程度为 38.32%。

目前萨北开发区已进入特高含水后期开发阶段,液油比急剧升高,低效和无效循环严重。通过重点攻关以“控制低效无效循环,注水优化调整”为核心的特高含水后期精准挖潜技术和以“全过程监测与自动控制分层注水”为核心的第 4 代智能分层注水工艺,实现油田经济有效开发。2019 年综合含水为 95.35%,原油产量为 138.84×10⁴t/a,采出程度为 40.84%。萨北开发区水驱技术的进步和创新,有效地保障了油田的可持续发展,延长了油田的开发生命周期。

3.3 三次采油

三次采油是指将热介质、化学介质和气介质等注入二次采油开发后的油层,进一步扩大波及体积和提高驱油效率,从而提高油田的最终采收率。中国三次采油技术的研究已有近 60 年的历史,取得了突破性进展。大庆油田聚合物驱和三元复合驱已实现了规模化应用^[29-30]。

3.3.1 聚合物驱提高采收率技术

20 世纪 60 年代萨北开发区针对聚合物驱技术开

始室内基础研究,1972年进行了先导性矿场试验,于1996年实现了工业化推广应用。历经25年实践、认识、再实践、再认识的不断探索和创新,形成了聚合物黏弹性驱油理论^[31-34],发展了以“中分中浓”注入体系为核心的注入参数优化设计技术,建立了“匹配体系、个性设计、规模分注、适时调剖、及时调整”五位一体的聚合物驱综合调整模式。依据聚合物分子量、浓度与渗透率匹配关系,优化区块分子量和注入浓度。萨北开发区16个注聚区块中有14个区块采用了“中分中浓”注入体系,单井匹配率达到95%以上;单井注入方案结合了油层发育特点和剩余油分布状况,对注入浓度和强度进行了最小尺度个性化设计;针对层间矛盾突出的井区,按照“纵向上对应成段,平面上集中成片”的原则,规模实施分注,一类油层分注率可达80.2%,二类油层分注率可达90.1%;在聚合物驱不同阶段,针对低效和无效循环的注入井,适时开展深度调剖;坚持“周跟踪、月调整”原则,月度调整比例达到10.0%以上,有力保证了聚驱开发效果。

1995年,开发区北二西东块投注聚合物,标志着萨北油田聚合物驱实现了工业化应用。截至2019年12月,16个聚合物驱工业化区块综合含水为96.97%,原油产量为 $75.80 \times 10^4 \text{ t/a}$,累积产油量为 $3\,957.00 \times 10^4 \text{ t}$,累积增油量为 $2\,359.00 \times 10^4 \text{ t}$ 。其中,北二东东块葡一组油层采用聚合物驱,提高采收率15.51%,最终采收率达到59.67%。萨北开发区聚合物驱原油产量连续21年超过 $100 \times 10^4 \text{ t/a}$,进一步延长了油田开发生命周期。

3.3.2 三元复合驱提高采收率技术

1972年大庆油田开始探索三元复合驱油技术,经过室内基础研究、先导性矿场试验和工业性矿场试验,突破了低酸值原油三元复合驱油理论、表面活性剂国产化及油藏、地面、采油工程的配套技术等瓶颈,于2014年实现了工业推广应用。

萨北开发区于2004年率先开展了小井距南井组弱碱三元复合驱先导性矿场试验,2008年开展了北二西区二类油层弱碱三元复合驱工业性矿场试验,2013年开展了北三东区二类油层弱碱三元复合驱示范区。通过现场试验形成了弱碱三元复合驱4项技术:①油藏方案设计技术,建立了开采对象技术标准、开发层系组合技术标准和井网井距设计方法;②驱油方案设计技术,通过“三配伍”(与储层、原油、水质配伍)和“五评价”界面张力、稳定性、乳化、吸附、岩心驱油,优化出适用于大幅度提高采收率的弱碱三元复合驱油体系;③开发综合调整技术,创新了“调平衡、提动用、保能力、提效率”的综合调整模式,提高了整体三元驱效果;④采油和地面工艺配套技术,研发了采油井结垢判别

图版、新型清防垢剂及举升配套工艺和适合弱碱三元

的配注工艺、采出液处理技术。

萨北开发区2015年实现了弱碱三元复合驱的工业化推广,目前已在6个区块推广。截至2019年12月,复合驱区块综合含水为92.47%,原油产量为 $129.20 \times 10^4 \text{ t/a}$,累积产油量为 $884.14 \times 10^4 \text{ t}$,累积增油量为 $307.00 \times 10^4 \text{ t}$ 。其中,北三东西块二类油层复合驱示范区采用三元复合驱提高采收率24%,最终采收率达到66.83%。三元复合驱产量已连续4年超过 $100 \times 10^4 \text{ t/a}$,进一步延长了油田的开发生命周期。

3.4 四次采油

四次采油是指将堵调驱介质等注入经历三次采油开发过的油藏,封堵优势渗流通道,进一步扩大波及体积,以显著提高驱油效率的一种提高采收率方法。萨北开发区一类油层已全面推广应用化学驱,二类油层正在陆续动用。截至2019年12月,化学驱动用储量 $2.0 \times 10^4 \text{ t}$,仍有40%以上的优质储量存留地下,这是延长油田开发寿命的重要潜力。

化学驱后油层开采难度大,属世界级开发难题,主要表现在两个方面,一是化学驱后油层剩余油饱和度低,且高度分散;二是化学驱后油层优势渗流通道发育,低效和无效循环严重^[35]。针对上述难题,“十一五”(2006—2010年)以来萨北开发区开展了四次采油技术研究,明确化学驱后“堵、调、驱”相结合的技术路线,研究基于厚油层内部构型的宏观剩余油描述方法和基于微观孔隙结构的微观剩余油赋存状态,形成了优势渗流通道识别与治理技术,研发了适合聚合物驱后油层的复合驱。现场试验表明,复合驱可进一步提高采收率12%,最终采收率达到70.87%^[36]。

为了更大幅度提高采收率、延长油田的开发寿命,未来较长一段时间,要重点研发以液流转向和能与原油形成中相微乳液为代表的自适应复合驱方法。室内实验聚驱后可提高采收率20%,剩余油饱和度降至5%以下,正在进行现场试验方案的设计。若这项技术获得成功,将大幅提高原油采收率,进一步延长萨北油田的开发寿命。

4 油田开发生命周期预测

截至2019年底,大庆油田萨北开发区动用地质储量为 $6.13 \times 10^8 \text{ t}$,累积产油量为 $2.90 \times 10^8 \text{ t}$,原油产量为 $345 \times 10^4 \text{ t/a}$,综合含水为95.21%。

4.1 油田开发生命周期预测遵循的原则

(1) 遵循油田开发规律,依据最优耗竭理论^[37],明确油田合理开采速度变化模式——油田合理开采速度呈偏正态分布。

(2) 遵循可持续发展原则,采取“整体适度开发,结构均衡开采”的开采方式——产量变化符合有序递减模式^[38]。

(3) 遵循资源合理利用原则,充分考虑技术进步,为油田尽可能提高采收率留有充分的时间和物质——储量及技术合理有序接替。

4.2 油田开发生命周期预测数学模型

翁氏预测模型是石油产量全过程基础预测模型,在油田开发指标预测中具有重要的地位和应用价值^[39]:

$$\int_0^t Q_o dt \leq N_R \tag{1}$$

$$Q_o = a_1 t^{b_1} \exp(-t/c_1) \tag{2}$$

$$t \leq T \tag{3}$$

偏正态分布数学模型是基于矿场统计与概率理论建立的适用于原油开采全过程的指标预测模型^[40]:

$$N_p(t) = \frac{a_2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t Q_o^{-\frac{b_2 t^2}{2}} dt \tag{4}$$

$$N_p \leq N_R \tag{5}$$

$$t \leq T \tag{6}$$

4.3 不同情景模式下油田开发生命周期预测

基于萨北开发区现有储量和开采技术条件,水驱已动用储量通过井网加密和二、三结合等技术手段预计还可增加可采储量约 $80.0 \times 10^4 \text{t}$ 。三次采油剩余潜力达 $2.2 \times 10^8 \text{t}$,按照聚合物驱提高采收率 15%、复合驱提高采收率 20% 测算,可增加可采储量 $3\,675.0 \times 10^4 \text{t}$ 。综上分析,大庆油田萨北开发区在现有剩余可采储量 $1\,686.0 \times 10^4 \text{t}$ 的基础上,还可增加可采储量 $3\,755.0 \times 10^4 \text{t}$,共计 $5\,441.0 \times 10^4 \text{t}$,按有序递减开采模式,可开采至 2070 年。

新技术、新方法的不断突破将为油田提高采收率和产能建设提供新的助力。①四次采油等进一步提高聚合物驱后油层采收率的技术获得突破,按地质储量为 $2.25 \times 10^8 \text{t}$ 、采收率提高 12% 测算,将增加可采储量 $0.27 \times 10^8 \text{t}$;②三类油层三次采油提高采收率技术获得突破,按 $1.04 \times 10^8 \text{t}$ 地质储量、采收率提高 10% 测算,将增加可采储量 $0.10 \times 10^8 \text{t}$;③目前三次采油储量若考虑应用抗盐聚合物和新型高效复合驱油体系,预计在常规聚合物驱和三元复合驱的基础上可分别进一步提高采收率 2% 和 5%,增加可采储量 $0.06 \times 10^8 \text{t}$ 。上述新增可采储量,依照三次采油偏正态采油速度开采模式,在 2025 年以后逐步规模应用,大庆油田萨北开发区可开采至 2080 年。

此外,已有储备技术的持续进步会进一步增加新的可采储量。根据技术发展规划远景部署,随着纳米智能驱油、残余油微生物产甲烷气开采等颠覆性技术

取得突破,已动用储量按提高采收率 10% 测算,预计还可增加可采储量 $0.60 \times 10^8 \text{t}$;萨北开发区扩边未实施开发的地质储量 $1.33 \times 10^4 \text{t}$,按采收率 35% 测算,可增加可采储量 $465.00 \times 10^4 \text{t}$ 。考虑到 2035 年以后技术成熟逐步动用,预计大庆油田萨北开发区可以开采至 2110 年以后(图 5)。

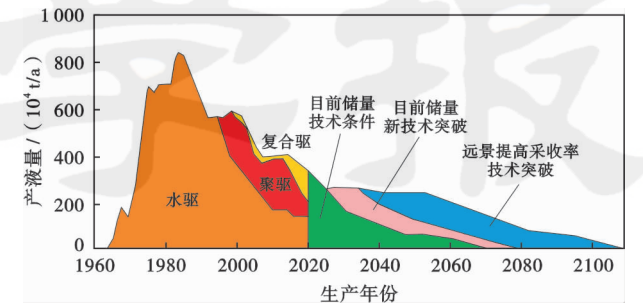


图 5 已有认知和手段条件下大庆油田萨北开发区原油产量和油田开发生命周期预测

Fig. 5 Prediction of crude oil production and oilfield development life in Sabei development zone of Daqing Oilfield based on the existing understandings and methods

可以确信,随着人们认识油藏的能力不断深化和技术不断进步,油藏的寿命会进一步延续,这是一个需要接力探索和持续创新的重大科学命题。

5 结 论

(1) 一个油气藏从油气生成至消亡的进程,与其所经历的地质历史和地质作用以及人工开采因素有关。人工开采加快油气藏消亡的进程,但开发所采用的方式和技术手段不同,油田开发生命周期也不同。油田通过不断创新应用新方法、新技术,增加地质储量和可采储量,可有效延长开发生命周期。

(2) 大庆油田萨北开发区根据不同开发阶段的特点和矛盾,研发了以早期注水、分层开采、加密调整为主的二次采油技术和以聚合物驱、三元复合驱为主的三次采油技术以及以自适应驱油体系为主的化学驱后四次采油技术,大幅提高了油田采出程度,有效延长了油田寿命。

(3) 未来勘探开发理论和技术水平的不断提高,将有效增加油田地质储量和可采储量,进一步延长油田开发生命周期。

符号注释: Q_o —产油量, 10^4t ; N_p —累积产油量, 10^4t ; N_R —最终可采储量, 10^4t ; t —时间, a ; T —油田开发生命周期, a ; a_1 、 b_1 、 c_1 、 a_2 、 b_2 —矿场经验或拟合系数; S_{or} —含油饱和度。

参 考 文 献

- [1] 孙龙德. 塔里木盆地轮南地区三叠系油气地质模型及油气预测研究[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2000.
SUN Longde. Study of petroleum geological model and oil/gas prediction of Triassic in Lunnan area Tarim basin[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, 2000.
- [2] SU Yanchun. Novel methods to prolong the life of mature offshore oilfield under low oil price condition[R]. IPTC 19370, 2019.
- [3] YESQUEN S, CARRO J L, LOPEZ L. Integrated reservoir management for life extension of a mature and marginal oilfield-Talara Basin, Peru[R]. SPE 97637, 2005.
- [4] DEWEES L, WAHLEITHNER J, THOMPSON D, et al. Aligned interest business concept utilizes innovative technologies to extend the useful life of a cook inlet oilfield[R]. SPE 35700, 1996.
- [5] FORREST J K, HUSSAIN A, OROZCO M, et al. Samarang field-seismic to simulation redevelopment evaluation brings new life to an old oilfield, Offshore Sabah, Malaysia[R]. IPTC 13162, 2009.
- [6] 李永太, 孔柏岭, 李辰. 全过程调剖技术与三元复合驱协同效应的动态特征[J]. 石油学报, 2018, 39(6): 697-702.
LI Yongtai, KONG Bailing, LI Chen. Dynamic characteristics of synergistic effect between profile control technology throughout flooding and ASP flooding[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(6): 697-702.
- [7] МУСЛИМОВ Р Х. Новый взгляд на перспективы развития супергиганского Ромашкинского нефтяного месторождения [Z]. Геология нефти и газа, 2007.
- [8] МУСЛИМОВ Р Х. Разработка супергиганского Ромашкинского месторождения: прошлое, настоящее, будущее [Z]. Нефтяная и газовая промышленность, 2008.
- [9] МУСЛИМОВ Р Х. Методы повышения эффективности разработки нефтяных месторождений на поздней стадии [Z]. Нефтяное Хозяйство, 2008.
- [10] ГАВРИЛОВ В П. Возможные механизмы естественного восполнения запасов на нефтяных и газовых месторождениях[Z]. Геология нефти и газа, 2008.
- [11] КОЗЛОВА О С. Влияние региональных фаз жизненного цикла нефтедобычи на длительность жизненного цикла отрасли [Z]. 2017.
- [12] МУСЛИМОВ Р Х. Роль старых нефтедобывающих районов в энергетической стратегии России в первой четверти 21 столетия [Z]. Управление, экономика и право, 2003.
- [13] МУСЛИМОВ Р Х. Совершенствование проектирования разработки основа поступательного развития нефтяной промышленности [Z]. Нефтяная и газовая промышленность, 2007.
- [14] МУСЛИМОВ Р Х. Опыт и проблемы совершенствования проектирования разработки нефтяных месторождений в Республике Татарстан [Z]. Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений, 2009.
- [15] 闫长辉, 张善文, 荣启宏. 油藏的生命周期与成藏阶段的划分[C]// 全国第三次含油气系统应用进展研讨会论文集. 重庆: 中国石油学会, 2004: 53-57.
YAN Changhui, ZHANG Shanwen, RONG Qihong. The division of reservoir life cycle and accumulation stage[C]// Proceedings of the third National Symposium on Application Progress of Petroleum System. Chongqing: Chinese Petroleum Society, 2005: 53-57.
- [16] 李明诚, 马成华, 胡国艺, 等. 油气藏的年龄[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(6): 653-656.
LI Mingcheng, MA Chenghua, HU Guoyi, et al. Age of oil accumulation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(6): 653-656.
- [17] MILLER R G, 冯力. 全球石油资源及其利用期限的估算[J]. 石油地质科技动态, 2000(4): 19-34.
MILLER R G, FENG Li. Estimation of global petroleum resources and their exploitation time[J]. Science and Technology Development in Petroleum Geology, 2000(4): 19-34.
- [18] MACGREGOR D C. Factors controlling the destruction or preservation of giant light oilfields[J]. Petroleum Geoscience, 1996, 2(3): 197-217.
- [19] 高波, 沃玉进, 周雁, 等. 贵州麻江古油藏成藏期次[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 417-423.
GAO Bo, WO Yujin, ZHOU Yan, et al. Hydrocarbon accumulation phases of Majiang paleo-oil reservoir in Guizhou[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 417-423.
- [20] 王小林, 常毓文, 窦宏恩. 东得克萨斯油田对我国大型油田开发的启示[J]. 国外油田工程, 2010, 26(9): 15-19.
WANG Xiaolin, CHANG Yuwen, DOU Hongen. The experiences from east Texas oilfield being of great significance for the large oilfield development in China[J]. Foreign Oilfield Engineering, 2010, 26(9): 15-19.
- [21] 王飞宇, 张水昌, 梁狄刚. 塔中 4 油田油气水界面的变迁与成藏期[J]. 新疆石油地质, 2004, 25(5): 560-562.
WANG Feiyu, ZHANG Shuichang, LIANG Digang. Evolvement of oil-gas-water contact and timing of petroleum accumulation in Tazhong-4 oilfield, Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2004, 25(5): 560-562.
- [22] 孙龙德, 江同文, 徐汉林, 等. 非稳态成藏理论探索与实践[J]. 海相油气地质, 2008, 13(3): 11-16.
SUN Longde, JIANG Tongwen, XU Hanlin, et al. Exploration and practice for theory of unsteady-state hydrocarbon accumulation[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2008, 13(3): 11-16.
- [23] 王建新, 计秉玉, 宋吉水, 等. 大庆油田开发历程(1960—2000 年) [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 145-178.
WANG Jianxin, JI Bingyu, SONG Jishui, et al. The development course of Daqing oilfield (1960—2000) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 145-178.
- [24] 刘丁曾, 王启民, 李伯虎. 大庆多层砂岩油田开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996: 94-130.
LIU Dingzeng, WANG Qimin, LI Bohu. Development of multi-zone sandstone reservoirs in Daqing oilfield[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996: 94-130.
- [25] 袁庆峰. 大庆油田开发历程[J]. 大庆石油地质与开发, 1989, 8(3): 73-80.
YUAN Qingfeng. The development course of Daqing oilfield[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1989, 8(3): 73-80.

[26] 唐曾熊. 大庆油田开发三十年的回顾与展望[J]. 大庆石油地质与开发, 1989, 8(3): 43-47.
TANG Zengxiong. Retrospects of the past 30 years & prospects for the future: Daqing oilfield[J]. Petroleum Geology & oilfield Development in Daqing, 1989, 8(3): 43-47.

[27] 计秉玉, 李彦兴. 喇萨杏油田高含水期提高采收率的主要技术对策[J]. 大庆石油地质与开发, 2004, 23(5): 47-53.
JI Bingyu, LI Yanxing. Main technical countermeasures of enhanced oil recovery during high water cut stage in La-Sa-Xing reservoirs[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2004, 23(5): 47-53.

[28] 刘合. 分层注水高效测调工艺技术及管理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2016: 1-74.
LIU He. Technology and management of high-efficient measuring and regulating for water injection in separated layers[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016: 1-74.

[29] 李杰训, 赵忠山, 李学军, 等. 大庆油田聚合物驱配注工艺技术[J]. 石油学报, 2019, 40(9): 1104-1115.
LI Jiexun, ZHAO Zhongshan, LI Xuejun, et al. Polymer flooding technology in Daqing oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(9): 1104-1115.

[30] 朱焱, 高文彬, 李瑞升, 等. 变流度聚合物驱提高采收率作用规律及应用效果[J]. 石油学报, 2018, 39(2): 189-200.
ZHU Yan, GAO Wenbin, LI Ruisheng, et al. Action laws and application effect of enhanced oil recovery by adjustable-mobility polymer flooding[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(2): 189-200.

[31] 吕平. 毛管数对天然岩心渗流特征的影响[J]. 石油学报, 1987, 8(3): 49-54.
LÜ Ping. The influence of capillary numbers on the sweep efficiency of a sand core[J]. Acta Petrolei Sinica, 1987, 8(3): 49-54.

[32] 王德民, 王刚, 吴文祥, 等. 黏弹性驱替液所产生的微观力对驱油效率的影响[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2008, 23(1): 43-55.
WANG Demin, WANG Gang, WU Wenxiang, et al. Influence of the micro-force produced by viscoelastic displacement liquid on displacement efficiency[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2008, 23(1): 43-55.

[33] 王德民, 程杰成, 夏惠芬, 等. 粘弹性流体平行于界面的力可以提高驱油效率[J]. 石油学报, 2002, 23(5): 48-52.
WANG Demin, CHENG Jiecheng, XIA Huifen, et al. Improvement of displacement efficiency of cores by driving forces parallel to the oil-water interface of viscous-elastic fluids[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(5): 48-52.

[34] 王德民, 程杰成, 杨清彦. 粘弹性聚合物溶液能够提高岩心的微观驱油效率[J]. 石油学报, 2000, 21(5): 45-51.
WANG Demin, CHENG Jiecheng, YANG Qingyan. Viscous-elastic polymer can increase micro-scale displacement efficiency in cores[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(5): 45-51.

[35] 孙龙德, 伍晓林, 周万富, 等. 大庆油田化学驱提高采收率技术[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 636-645.
SUN Longde, WU Xiaolin, ZHOU Wanfu, et al. Technologies of enhancing oil recovery by chemical flooding in Daqing oilfield, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 636-645.

[36] 韩培慧, 曹瑞波, 刘海波, 等. 聚合物驱后油层特征和自适应复合驱方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(5): 254-264.
HAN Peihui, CAO Ruibo, LIU Haibo, et al. Oil reservoir characteristics and adaptive compound flooding method after the polymer flooding[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(5): 254-264.

[37] 杨海生. 矿产资源及不确定条件下的最优开发[D]. 广州: 中山大学, 2006.
YANG Haisheng. Exhaustible resources and optimal exploitation under uncertainty [D]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University, 2006.

[38] 王小马. 可耗竭资源最优消耗问题研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007.
WANG Xiaoma. Research on optimal exhaustible resource depletion[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2007.

[39] 陈元千, 邹存友. 预测油田产量和可采储量模型的典型曲线及其应用[J]. 石油学报, 2014, 35(4): 749-753.
CHEN Yuanqian, ZOU Cunyou. Model's typical curve and its application for forecasting production and recoverable reserves of oilfields[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4): 749-753.

[40] 董连平, 樊民强, 杨宏丽, 等. 基于广义偏斜正态分布的分配曲线数学模型[J]. 煤炭学报, 2013, 38(10): 1856-1861.
DONG Lianpin, FAN Minqiang, YANG Hongli, et al. Mathematical model for partition curve based on generalized normal skew distribution[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(10): 1856-1861.

(收稿日期 2020-09-14 改回日期 2020-11-04 编辑 肖 飞)