

文章编号: 1000-0747(2006)04-0393-06

边际油田开发技术现状、挑战与对策

赵文智, 胡永乐, 罗凯

(中国石油勘探开发研究院)

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司重大油气开发方案研究(040156)

摘要: 中国陆上边际油田主要包括低渗透、稠油和复杂断块等特殊类型难采油田。中国在难采边际储量的开发方面进行了大量的研究和现场试验, 积累了一些成功的经验, 初步建立难采边际油田经济有效的开发技术。近年新发现的油田绝大部分属于特低渗、低产、低丰度、高黏度等边际油田, 开采难度增大。因此, 迫切需要加强地质和工程基础研究, 加强技术创新, 积极探索针对不同油藏的开发模式和策略, 积累经验, 转变观念, 创立科学、实用和有效的技术措施。边际油田开发最核心的问题是经济问题, 因此必须因地制宜, 降低成本, 简化钻采工艺、地面工艺和流程, 借鉴其他类型油藏的开发技术, 提高边际油田经济效益。参 34

关键词: 边际油田; 开发技术; 现状; 挑战; 对策

中图分类号: TE3

文献标识码: A

Status quo, challenges and future strategies of development technology for marginal oil fields in China

ZHAO Wen-zhi, HU Yong-le, LUO Kai

(Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina Beijing 100083, China)

Abstract: Onshore marginal oil fields in China primarily refer to the difficult-to-produce fields with complex geology, including low-permeability, heavy oil and complex faulted-block fields, etc. A large amount of in-door researches and field pilot tests on marginal oil fields have been carried out in China. Successful experiences have been accumulated and the cost-effective technology for the development of marginal fields established. Most of the recently discovered fields are classified as marginal fields and featured by ultra-low permeability, low productivity, low abundance and/or high viscosity, imposing a challenging problem of development on operators. It is crucial to establish scientific, practical and cost-effective technologies by enforcing basic studies on geology and engineering, enhancing technological innovations, rigorously groping for the development modes and strategies under different circumstances, accumulating good experiences and changing bias ideas on the marginal fields. The economic issue is the key problem for the marginal field development. Methods and technologies capable of reducing the costs and suited to local conditions should be encouraged.

Key words: marginal oil field; development technology; current status; challenge; countermeasure

0 引言

目前, 对边际油田概念的理解存在一些差异^[1-3]。中国陆上边际油田主要针对油藏的地质条件和流体特性而言^[4], 包括低渗透、稠油以及复杂断块等特殊类型难采油田。

近年来, 随着经济快速发展, 石油需求越来越大, 石油消费逐年增长, 2005年中国石油对外依存度高达42.9%, 石油安全问题日益突出。但目前中国陆上主力油田多处于高含水后期开发阶段, 产量已明显呈递减趋势。已探明可供开发的整装优质储量甚少, 新增和未动用储量多为岩性复杂的低渗透和稠油储量, 且低渗、特低渗储量比例越来越大。2005年新一轮全国油气资源评价表明, 中国边际油田资源量约占总资源

量的一半^[4,5]。这意味着中国探明储量开发难度将进一步加大^[6-8]; 同时, 边际油田开发在未来原油增产中将占越来越重要的地位。

1 边际储量开发技术现状

经过数十年的发展, 中国石油工业不仅在常规油藏开发方面取得了辉煌成就^[9-13], 创立了富有中国特色的陆相油田开发理论^[9], 同时也在难采边际储量的开发方面积累了丰富的经验, 形成了特殊难采边际油田开发技术。

1.1 创立低渗透油田经济有效开发技术和开发模式, 促进中国原油持续稳定增长

低渗透油田在中国广泛分布^[9-14], 从东部的大庆长垣周围、渤海湾盆地, 到中部的鄂尔多斯盆地, 西部的

准噶尔盆地等均有发现。

延长油田很早就开始探索低渗透油田开发技术,极大地促进了延长油田的发展。长庆、吉林油田都进行了大面积低渗透油田开发。目前低渗透油田开发主体技术包括^{7,8}:①开展油藏精细描述,寻找相对高产富集区(即“甜点”);综合应用地应力、测井、地质和地震确定裂缝的分布规律。②实行早期或超前人工注水,保持油藏压力,提高原油的驱动能,并避免储集层的应力敏感性伤害。③实施整体压裂或有效的重复压裂,保证油井达到经济产能。④优化开发井网部署,采用较小井距、较大井网密度,保证有较大的注采压差。⑤预测地应力方向及地应力参数,注重注采系统与地应力方向保持一定的角度,以避免注入水沿人工或天然裂缝突进,并尽可能利用人工裂缝扩大波及体积。⑥早期实施人工举升开采方式,以保持采油井有较大生产压差,提高单井产量。⑦采取严格的油层保护措施,保证注入水水质;实施高压注水,保证注采平衡。⑧采用丛式井、小井眼钻井,简化地面集输流程,提高低渗透油田开发整体效益。

随着勘探开发程度的深入和工艺技术的不断提高,低渗透油藏投入开发的逐年增加,产量比例呈上升趋势,形成了松辽盆地南部及外围、长庆、延长、新疆、吐哈等多个较大型的低渗透油田开发生产基地,并将在今后石油增储上产中发挥更大的作用¹⁷。

1.2 水平井技术使薄互层和复杂断块边际油田得以高效开发

对于薄层油藏,由于储集层厚度很小、产能低,单纯的压裂改造不仅不能实现大幅度提高产能的目的,甚至可能无法收回成本,针对此类边际油田,中国成功地探索出水平井或双台阶水平井开发方式,水平井技术在复杂断块油田也得到了成功应用。

塔里木哈得4油田的开发面临诸多难题:埋藏深(大于5100m)、构造幅度低、构造精细描述难度大、油层超薄(平均厚度不超过1.5m)、储量丰度低(远小于50万t/km²)、产能偏低、储量品位偏低、有效开发难度大,且油田地处沙漠边缘、远离已开发油田基地。因此,哈得4油田在滚动勘探开发过程中,大力加强技术攻关⁶,形成了复杂油藏的地震、测井、综合地质等手段有机结合的配套描述技术、水平井滚动勘探开发配套技术、整体采用水平井井网及注采井网的高效开发技术以及钻采配套技术,不仅能够在超薄的油层中有较长的注水井段,还能实现对两个开发层系同时注水。实践证明双台阶水平井不仅实现了对两套井网同时注水,还具有注水量大、注水压力低、波及系数大、驱油效

率高的特点。哈得4油田是中国第一个采用水平井注水开发的边际油田。

冀东油田结合其油藏的地质和开发特点,逐步形成了一套适合复杂断块油藏地质特点与开发水平的水平井地质论证、钻采设计与施工、生产管理等方面的技术方法,有效保证了冀东复杂小断块油藏水平井开发技术的应用效果。2002年以来冀东油田水平井生产井数仅占油田生产总井数的13.6%,而产量占全油田产量的33.3%,为油田快速上产做了重要贡献,也为进一步推动水平井技术在同类油藏中的应用提供了经验^{15,19}。

此外,在大庆外围的葡萄花特低丰度薄互层边际油藏也进行了水平井试验¹⁷。两口试验井均取得了较好的开发效果,为提高特低丰度葡萄花油层储量动用程度,加快上产步伐开辟了新的途径⁹。

1.3 蒸汽吞吐为核心的开发配套技术使稠油难采油藏得到高效开发

经过20多年的探索,创建了中国稠油开发模式,形成了富有特色的热采工艺技术系列⁹,包括稠油油藏描述、热采数值模拟和物理模拟、高效注入和动态监测、高效隔热及保护套管、热采完井和防砂工艺、分层注汽及调剖工艺、化学剂助排解堵和降黏增产、热采油井机械采油、丛式井和水平井开发等技术^{18,19}。

以蒸汽吞吐为核心的开发配套技术为中国稠油油田的开发奠定了重要的技术基础²⁰。目前,已形成辽河、新疆、胜利和河南等稠油开采基地,从1993年开始已连续10多年保持稠油产量超过1000万t²⁰。

近年来,主力稠油热采油田已进入高轮次蒸汽吞吐阶段。为了改善蒸汽吞吐开采效果,开展了组合式蒸汽吞吐、注采参数优化设计、水平井开采、注化学添加剂、注非凝析气辅助蒸汽吞吐、高温调剖和多井整体蒸汽吞吐等技术的研究,改善了稠油油层纵向动用程度,提高了高轮次蒸汽吞吐效果,延长了蒸汽吞吐周期。组合式吞吐可延长2~3个吞吐周期,提高吞吐阶段采收率2%~3%。特别是超稠油蒸汽吞吐开发,形成了大机、长泵、真空隔热管、中频电加热和超稠油注、采、冲、防一体管柱等一系列配套的稠油举升技术,使开采成本不断降低,超稠油产量也大幅度增长²⁰。

2 边际油田开发面临的挑战

虽然中国已积累了丰富而宝贵的边际油田开发经验,创立了独具特色的、科学有效的开发技术,但随着开发程度的提高、勘探的深入,将面临更多、更新的问题和挑战。

2.1 未来储量品质不会有根本性的好转, 边际资源将是未来勘探开发的主体

中国主力油田已开发数十年, 整体已进入高含水、高采出程度阶段。主要老油田已进入递减期, 产量呈递减趋势。在勘探程度较高的区域, 大型油气藏发现的机会越来越少, 油气藏类型越来越隐蔽和复杂, 储集条件越来越差, 原油性质越来越多样化, 储量的品位越来越低^[21, 22]。“十五”期间发现的石油资源品质变差, 新探明储量中低渗透储量比例从30%左右上升到70%左右; 油藏规模变小, 储量从2000万t下降到约200万t; 储量丰度也下降, 从100万t/km²下降到50万t/km²。据新一轮油气资源评价表明, 边际原油地质资源达360~400亿t, 约占地质资源总量的40%~45%。

目前中国70%的储量在沙漠、海洋、山地等地区, 勘探开采环境恶劣、难度大、成本高。“十一五”期间新发现储量仍将主要位于沙漠、戈壁、山地、深海等地表地质条件更为复杂的地区^[22]。

2.2 已开发低渗透油田开采难度越来越大

由于油藏的低渗特性, 已开发低渗透油田开采难度越来越大, 主要表现在^[7, 8]: ①储集层有效性评价、裂缝识别和相对富集区的筛选难度较大, 导致高效布井难度大。②油藏原始含油饱和度低(一般都小于55%, 有的甚至低至35%), 驱油效率低(45%~50%), 单井产能低(2~3t/d), 采油速度低(平均小于1%)。③稳产期短, 见水后采油指数急剧下降, 进入高含水期一般意味着稳产期结束。在衰减期内, 年自然递减率较高, 一般在10%以上。④开发后期, 见水层与未见水层之间的矛盾、层内平面矛盾更加突出。⑤枯竭式开采递减速度快, 注水开发见效慢、易水窜、套损严重。⑥低渗透油田开发中后期采油工艺技术的适应性问题更加突出。低渗透油藏在长期注水开发中, 由于注入水与储集层岩石矿物作用产生新的结晶矿物, 引起层内、井筒和地面集输管线结垢以及其他地层污染。在注入水与地层不匹配的情况下, 更加剧了油田的地下矛盾, 导致油田产量递减加快。⑦需要密集井网开发, 高投入、低产出, 开发风险大, 综合治理难度大。

2.3 探明储量动用状况仍需提高, 大量特低、超低渗透储量急待动用

目前, 中国探明的低渗透储量逐年上升, 尤其是特低渗透储量的比例越来越大。例如, 1989年陆上新增探明储量中, 低渗透储量占27.1%, 1990年占45.9%, 1995年达72.7%。到2005年, 仅中国石油天然气股份有限公司的特低渗透油藏(渗透率小于5mD)储量就占2005年总探明储量的53%。

中国低渗透油藏探明储量动用率不高, 多数低丰度、特低渗透油藏在目前的经济技术条件下仍难以动用。预计今后的探明储量将以低渗透油藏为主。经济、有效地提高低渗透油田的开发水平, 具有重要的意义。因此必须采用先进有效的特低、超低渗透等油藏开采配套技术, 推动低品质难采储量的经济有效动用^[6-8]。

2.4 稠油开发急需有效的接替开采技术, 超稠油开采需要技术探索

目前中国稠油油藏主要采用蒸汽吞吐、蒸汽驱和水驱3种开发方式^[20], 以蒸汽吞吐为主。蒸汽吞吐技术面临诸多难题, 多数区块平均蒸汽吞吐已达9.5周期, 地层压力水平已降至原始地层压力的25%~35%, 地层天然能量已严重不足, 导致周期产油量减少、油气比降低、开采成本上升、经济效益变差; 在现有开发方式下, 稠油热采老区经历了2~3次加密调整, 井距已从167~200m加密到70~100m, 井网加密后井距缩小, 平面汽窜及干扰频繁, 油层动用程度差, 继续加密调整的空间有限。蒸汽驱仅在克拉玛依浅层得到了规模应用, 对于深层稠油, 仅在个别区域进行了试验, 蒸汽驱技术还远没有成熟和完善。常规稠油水驱油水黏度比很高, 驱替效率低。因此, 急需有效的接替技术进一步提高已开发稠油油藏采收率。

对于超稠油, 由于蒸汽吞吐生产周期短, 产量递减速快, 2~3年的时间即进入蒸汽吞吐后期, 开采成本很高。目前, 中国大约有3亿t超稠油地质储量有待开采; 美国、加拿大和委内瑞拉等国以水平井为主的注蒸汽热采技术已经商业化应用。虽然国内进行了双水平井蒸汽辅助重力驱和单水平井注汽热采试验等, 但由于还未形成成熟的配套技术, 与规模化商业应用还有一定距离, 所以需要加大超稠油开采技术攻关力度, 探索适合中国超稠油特点的开采新途径和新技术。

3 边际油田开发对策

边际油田开发最核心的问题是经济问题。因此, 积极探索边际储量有效开发利用的经营机制, 加强边际油田开发技术研究和创新, 采取积极有效的对策, 是开发动用边际储量的必然途径。

3.1 更新观念, 创新体制, 建立良好的外部环境, 加速边际储量大规模开发利用

边际储量是一种宝贵资源。美国、加拿大等国家及欧洲北海诸国一直把边际储量的开发放在国家能源战略高度予以重视, 并积极采用新机制, 加速边际资源的开发和利用。

正如 Haynes 指出,美国早已成为利用边际油气井的国家。美国并未简单地废弃低产边际油气井,而是从国家能源供给的战略安全高度积极探讨边际井的利用和价值^[23],为此,能源部下属的国家能源技术实验室专门资助边际油气井的研究和利用。2003 年边际油井产量占美国原油总产量的 29%^[2],至今,这一比例仍在上升。

加拿大拥有大量稠油和油砂资源,为了利用和开发这些资源,专门组建公司进行研究和试验。在政府积极支持下,经过 20 多年的研究,创立了蒸汽辅助重力泄油等独特的商业开发技术,使油砂资源得到了大规模开采和利用。

近几年,中国也进行了一些体制方面的探索,并对外进行合资合作,取得了很好的效果。

中国对边际资源的经济评价往往采用常规油气资源的评价方法,很可能导致不能在市场经济条件下正确评估其真实价值,所以需要加强经济评价方法研究^[24],如实物期权评估法等^[25]。同时争取国家对边际资源的合理税费制度的支持,创造边际储量开发长期持续稳定增长的环境,加快边际储量大规模的开发和利用。

3.2 加强基础研究,促进低渗透油藏产量大幅度增长,加快特低渗透油层有效动用

低渗透储集层会存在相对高渗、裂缝发育带或次生孔隙发育带等油气相对富集高产的区带,这就需要:①加强此类油藏精细描述技术研究,发展认识有效储集层分布及油气富集规律的新方法和新技术,择优投入开发;②针对低渗透油藏油气富集区,深化裂缝预测,通过地质和油藏工程综合研究,优化开发井网井距和注采系统,提高开发效果;③通过发展油藏高效压裂改造及有效的钻采工艺技术,尽可能提高储集层的渗透性和油井产能,大幅度提高单井产量;④发展多种有效的手段和技术(例如小井眼技术、地面流程简化工艺技术),尽可能降低开采成本;⑤对已投入开发的低渗油藏,发展综合调整技术,不断提高开发效果和效益。通过上述研究,在低渗油田高效开发的理论方法、技术手段、开采效益等方面获得突破,从而在现有开发技术水平基础上,建立与不同低渗透油田特点相适应的高效开发配套技术,使得低渗甚至特低、超低渗油藏得以有效开发动用^[7]。

此外,由于低渗透油藏渗透率低,吸水能力差,甚至注不进水。因此,还需要研究高效的储集层保护和改造技术,发展低渗透油藏注气混相、近混相和非混相驱油等注气方式^[26-28]。如 CO₂ 就是很好的驱油剂,既

可用于轻质油藏实现混相驱和非混相驱,也可用于稠油油藏进行吞吐开采,同时还可以埋存 CO₂,在原油开采、降低温室效应等方面取得巨大的经济和社会效益。

3.3 坚持勘探开发一体化油藏评价技术,实现边际油田高效开发

勘探开发一体化技术是近年来国际上油藏管理重要的发展方向,具体要求是:地质与油藏、地质与钻井、油藏与工艺、地面与地下、研究与现场、管理与效益等 6 个方面的一体化;同时要求做好两个结合^[6]:①油藏评价与预探结合,坚持评价早期介入,跟踪预探成果,通过加强对预探成果的跟踪分析,及时搞好油藏评价计划调整和部署优化;②强化储集层评价与产能建设结合,评价井与产能井要统一部署,储量落实与产能建设同步进行,实现增储上产一体化,通过加强探井和评价井试采及产能评价,优化开发方案,整体部署,分步顺序滚动实施。

近年来,通过大力推进勘探开发一体化油藏评价和产能建设,加快了勘探开发的节奏。通过精细储集层和油水关系研究,落实微断层和微构造,优选相对富集区块,实施勘探开发一体化精细油藏评价,优化开发方案设计,总体部署,分布实施,滚动开发,迅速将吉林英坨、塔里木哈德 4、新疆陆梁等低幅度构造,薄层、油水同层等边际油田建成了百万吨产能,取得了非常好的开发效果和效益^[9]。

3.4 加强创新,积极采用新技术,高效开发边际储量

技术创新对于边际油田的开发尤为重要^[29]。丛式井^[30]、大位移水平井、“鱼骨状”或“翼状”等复杂结构多分支井使海上和陆上边际油田得以高效开发。例如阿拉斯加州北坡油区的 Badami 边际油田就是采用大位移水平井才使油田得以投入开发。

中国大庆和长庆油区在一些低渗透砂岩油藏中开展了水平井开采的现场试验,使一些边际油藏可经济有效开发;塔里木油田采用阶梯式水平井,使超深超薄边际油田得到有效开发;冀东油田采用水平井开发复杂断块油田,使油田产量实现了飞跃。

目前,陆上稠油油田开发所采用的蒸汽吞吐技术已进入高轮次吞吐阶段,开采效果越来越差,急需新的开发技术。包括组合式改善蒸汽吞吐技术、高效率的蒸汽驱油藏管理技术、中深层稠油油藏蒸汽驱工业化应用技术。为了解决丰富的超稠油资源开发,急需开展水平井与直井组合的蒸汽辅助重力泄油技术现场试验,发展化学辅助热水驱和火烧油层技术、携砂冷采技术,探索并发展热电联供技术等^[18-31]。此外,还需要积极发展油砂资源相应的开发技术^[32]。

国际上积极探索的智能井、聪明井技术已经展示出良好的应用前景。

为了促进中国边际油田开发,需要在水平井和复杂结构井的压裂技术、压裂增产新工艺和新材料、工程作业新技术、动态监测、油气混输地面工程技术等方面积极开拓创新。

3.5 因地制宜,简化工艺流程,善于借鉴成熟技术,提高边际油田开发效益

由于边际油田开发对经济条件非常敏感,所以必须针对不同情况,采用适宜的有效技术,实现边际油田的经济开采。

地面工程在油田开发投资中往往占有相当大的比例,也是边际油田开发中降低成本的重要环节。国内在开发边际油田过程中,创立了多种不同的开发模式,摸索出了许多独具特色的地面工程和建设模式,简化地面流程,降低了开采成本。

此外,要善于总结已有的开发技术,并推广应用到边际油田开发。例如高温蒸汽可以降低原油黏度,清除含蜡油层析出的蜡,提高油层孔隙的渗流能力,所以热采技术不但可以用于稠油开发,而且可以用于改善含蜡稀油油藏的开采效果^[33,34]。大庆油田在朝阳沟低渗透油田 142-69 井和 146-70 井开展蒸汽吞吐现场试验已取得成功。再如能否把二次采油和三次采油两者结合起来提高边际油田采收率,都值得进一步探索和试验。

因此,为了提高边际油田经济效益,必须因地制宜,降低成本,简化钻采工艺、地面工艺技术和流程,并善于借鉴其他类型油藏的开发技术。

4 结语

中国石油需求越来越大,但发现大型优质油田的概率越来越低,已开发主力油田产量整体呈递减趋势,边际油田在整个油田开发中的地位越来越突出。经过多年来的探索与试验,形成了具有特色的低渗透油田开发、勘探开发一体化评价和蒸汽吞吐开发等特殊油藏的开发配套技术。同时,中国油田开发难度与日俱增,还有大量的边际油田未得到有效动用。因此,需要转变观念,不断进行机制和技术创新,积极发展新的开发技术,加强开采机理研究,扩大开发试验,利用中国石油公司作为综合性公司的优势,使边际资源成为保障国家能源安全和经济飞速发展的重要支柱力量。

本文为第 18 届世界石油大会发言稿的扩充文本。在第 18 届世界石油大会报告期间,中国石油勘探开发

研究院沈平平教授对很多关键数据、结论表述与边际资源未来发展等重要问题均给予中肯建议,并对本文的成文给予指正,在此作者深表谢意。

参考文献:

- [1] Giannesini J F, Trouvé O, Vironaud C. Marginal fields development: strategic importance technological challenge [A]. WPC-Topic-6-4, 1994.
- [2] Duda J R, Covatch G, Remson D, et al. Projections of marginal wells and their contributions to oil and natural gas supplies [A]. SPE 98014, 2005.
- [3] Conway J, Rogers D. Marginal oil fields [A]. The proceedings of 16th world petroleum congress [C]. England: Institute of Petroleum, 2000. 352-353.
- [4] Zhao W Z, Hu Y L, Luo K. Status of production, technology improvement and challenges of marginal oil reserves in China [A]. WPC-Round Table-4, 2005.
- [5] Garber M. China: nearly half reserves are in marginal reservoirs [N]. 18WPC News of WPC, 2005-09-28(3).
- [6] 田昌炳. 油气藏评价技术 [A]. 袁士义. 油气藏工程技术进展 [C]. 北京: 石油工业出版社, 2006. 250-286. (TIAN Chang-bing. Reservoir evaluation technology [A]. YUAN Shi-yi. Advances in oil & gas reservoir engineering [C]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006. 250-286.)
- [7] 胡永乐, 宋新民, 杨思玉. 低渗透油气田开采技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002. (HU Yong-le, SONG Xin-min, YANG Si-yu. Development technology of low-permeability oil & gas fields [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.)
- [8] 胡永乐. 低渗透油藏评价与开发配套技术及实践 [A]. 方朝亮. 勘探开发集成配套技术及应用实践 [C]. 北京: 石油工业出版社, 2006. 179-217. (HU Yong-le. Low permeability oil reservoir evaluation and production-related supplemental technology and practices [A]. FANG Chao-liang. Integrated E & P supplemental technology and application practices [C]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006. 179-217.)
- [9] 傅诚德. 中国石油科学技术五十年 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2000. (FU Cheng-de. Fifty years history of petroleum science and technology in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000.)
- [10] 周总瑛, 张抗. 中国油田开发现状与前景分析 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(1): 84-87. (ZHOU Zong-ying, ZHANG Kang. Development situation and prospect of oil fields in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(1): 84-87.)
- [11] 李阳. 胜利油田油藏综合地球物理研究现状及展望 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(3): 10-13. (LI Yang. Prospecting and evaluation on the comprehensive geophysics studies of reservoirs in the Shengli Oilfield [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(3): 10-13.)
- [12] 别爱芳, 王立荣, 夏静, 等. “九五”期间 PetroChina 老区原油产能建设成效分析 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(3): 97-100. (BIE Ai-fang, WANG Li-rong, XIA Jing, et al. Achievements of projects for crude oil development of PetroChina produced oilfield

- units during the "Ninth-five Year Project" [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(3): 97-100.)
- [13] 鞠斌山, 樊太亮, 张金川, 等. 水驱开发油藏原油黏度变化规律及其对开发效果的影响 [J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(1): 99-102. (JU Bin-shan, FAN Tai-liang, ZHANG Jin-chuan, et al. Oil viscosity variation and its effects on production performance in water drive reservoir [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(1): 99-102.)
- [14] 闫存章, 李秀生, 常毓文, 等. 低渗透油藏小井距开发试验研究 [J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(1): 105-108. (YAN Cun-zhang, LI Xiu-sheng, CHANG Yu-wen, et al. Development of low permeability reservoir with closely-spaced wells [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(1): 105-108.)
- [15] 周海民. 复杂断块油田精细开发——渤海湾盆地南堡凹陷精细开发实践与认识 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2004. (ZHOU Hai-min. Rigorous development of complex block-faulted oil field—practices and review of Nanpu Sag in Bohai Gulf Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.)
- [16] 易士威, 王权. 冀中坳陷富油凹陷勘探现状及勘探思路 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(3): 82-85. (YI Shi-wei, WANG Quan. New concept of exploration strategy for the oil-rich Jizhong Depression [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(3): 82-85.)
- [17] 姜洪福, 隋军, 庞彦明, 等. 特低丰度油藏水平井开发技术与应用 [J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(3): 364-368. (JIANG Hong-fu, SUI Jun, PANG Yan-ming, et al. Technique of exceptionally low abundance oil reservoir development by horizontal wells and its application [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(3): 364-368.)
- [18] 牛嘉玉, 刘尚奇, 门存贵, 等. 稠油资源地质与开发利用 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. (NIU Jia-yu, LIU Shang-qi, MEN Cun-gui, et al. Resources, geology, development and utility of heavy oil [M]. Beijing: Science Press, 2002.)
- [19] 张人玲, 唐湘明. 砂泥薄互层稠油边际油藏经济开发方式 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(1): 100-102. (ZHANG Ren-ling, TANG Xiang-ming. Economic development plan for viscous crude marginal pool of thin multilateral sand and shale [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(1): 100-102.)
- [20] Shiyi Y, Yitang Z, Shuhong W, et al. Status of heavy-oil development in China [A]. SPE 97844, 2005.
- [21] 查全衡, 何文渊. 试论“低品位”油气资源 [J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(6): 5-7. (ZHA Quan-heng, HE Wen-yuan. A primary discussion on the “low grade resource” [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(6): 5-7.)
- [22] 李天星. 寻求油气勘探新突破 [J]. 中国石油企业, 2006, (3): 38-42. (LI Tian-xing. Pursuing new breakthrough of oil & gas exploration [J]. Chinese Petroleum Enterprise, 2006, (3): 38-42.)
- [23] Haynes C D. In conflict: marginal reserves vs. enforced abandonment [A]. SPE 27709, 1994.
- [24] 张韬. 中原油田储量资产化方法 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(5): 81-83. (ZHANG Tao. Reserves asset method for Zhongyuan Oilfield [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(5): 81-83.)
- [25] 张永峰, 杨树锋, 贾承造, 等. 石油勘探开发项目实物期权特性分析 [J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(1): 115-118. (ZHANG Yong-feng, YANG Shu-feng, JIA Cheng-zao, et al. Real option characters of petroleum exploration and development projects [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(1): 115-118.)
- [26] 王进安, 岳陆, 袁广钧, 等. 氮气驱室内试验研究 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(3): 119-121. (WANG Jin-an, YUE Lu, YUAN Guang-jun, et al. Laboratory research on nitrogen drive [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(3): 119-121.)
- [27] 郝永卯, 薄启炜, 陈月明. CO₂驱油实验研究 [J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(2): 110-112. (HAO Yong-mao, BO Qi-wei, CHEN Yue-ming. Laboratory investigation of CO₂ flooding [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(2): 110-112.)
- [28] 谈士海, 周正平, 吴志良, 等. 利用CO₂气驱开采复杂断块油藏“阁楼油” [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(4): 129-131. (TAN Shi-hai, ZHOU Zheng-ping, WU Zhi-liang, et al. Production of attic oil in complex fault block reservoir by CO₂ gas drive [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(4): 129-131.)
- [29] Moore R L, Mayfield W O. Patented innovations in casing plungers increase production in marginal Oklahoma Panhandle wells [A]. SPE 94016, 2005.
- [30] 葛云华, 鄢爱民, 高永荣, 等. 丛式水平井钻井平台规划 [J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(5): 94-100. (GE Yun-hua, YAN Ai-min, GAO Yong-rong, et al. Drilling pad optimization for oilfield development by cluster horizontal wells [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(5): 94-100.)
- [31] 张坚平, 牛瑞云. 深层稠油难动用储量压裂增产技术与试验 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(6): 112-114. (ZHANG Jian-ping, NIU Rui-yun. Fracturing technology research and test for deep heavy oil reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(6): 112-114.)
- [32] 洪宇, 尚波. 文南油田黑油砂 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(1): 106-107. (HONG Yu, SHANG Bo. The black oil sand in Wennan Oilfield, Dongpu Sag [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(1): 106-107.)
- [33] Yitang Z, Bingyu J, Xiuluan L, et al. Study on developing low-permeability reservoir with waxy oil by cyclic steam stimulation [A]. SPE 97797, 2005.
- [34] 张义堂, 计秉玉, 廖广志, 等. 稀油油藏注蒸汽热采提高开采效果 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(2): 112-114. (ZHANG Yi-tang, JI Bing-yu, LIAO Guang-zhi, et al. Enhancing development efficiency of conventional reservoir by cyclical steam stimulation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(2): 112-114.)

第一作者简介: 赵文智(1958-), 男, 河北昌黎人, 中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师, 博士生导师, 李四光地质科学奖获得者, 长期从事石油地质综合研究与油气勘探管理工作。地址: 北京市学院路20号, 中国石油勘探开发研究院院部, 邮政编码: 100083。E-mail: zwz@petrochina.com.cn

收稿日期: 2006-06-07

(编辑 郭海莉)