

找油没有捷径

——关于油气勘探的几点思考

马永生

(中国石油化工集团有限公司, 北京 100728)

摘要: 勘探家是油气勘探工作的组织者、管理者和油气勘探活动的实践者,也是掌握石油地质学及相关学科理论、熟悉勘探技术、灵活应用勘探方法、精通勘探管理的专门人才,既是业务专家,也是管理专家。成功的勘探家首先是要坚定找到油气的信心,具有“不盲从、不附和”的科学精神,并时刻保持思维的敏感性。勘探工作没有捷径,首先是要解决勘探的基础问题;其次是要坚持科学的勘探程序;再者是要有发展的意识、效益的意识、动态优化的意识,突出重点,持续优化勘探部署,确保完成勘探任务。要实现高质量勘探,思维方式要从传统的“以产量论英雄”思维向“以效益论英雄”思维转变,做好顶层设计,实现投资、效益和责任三统一,进一步完善与建立勘探部署比选机制和两级决策的管理新机制,坚决做到“五大转变”。随着地球物理勘探技术与钻、完井技术的迅猛发展,当前全球油气勘探正经历着深刻变化,并不断向更细、更深、更广、更难、更具挑战的领域发展。我国东部断陷盆地、海相碳酸盐岩、中西部碎屑岩、页岩气将是油气增储上产的主要领域。随着理论和技术的进步,煤层气、页岩油、油页岩等也是需要攻关和培育的重要领域。未来,随着非常规油气理论快速发展,对石油天然气地质基础理论体系不断拓展与完善,在新一代勘探开发智能化技术体系支撑下,将形成含油气盆地常规—非常规整体评价、多层系立体勘探的格局,并将带来新一轮油气储量、产量增长。

关键词: 油气发现;勘探技术;勘探家;中国

中图分类号: TE132.1

文献标识码: A

There is no shortcut to find oil: some thoughts on oil and gas exploration

MA Yongsheng

(SINOPEC Group, Beijing 100728, China)

Abstract: Explorers are the organizers, managers and practitioners of oil and gas exploration activities. They are also professionals who master petroleum geology and related disciplines, are familiar with exploration techniques, apply exploration methods flexibly, and are proficient in exploration management. So, they are both business and management experts. Successful explorers must first have a firm confidence in finding oil and gas, have a scientific spirit that does not blindly follow or agree, and always maintain a sensitivity of thinking. There are no shortcuts to exploration. First, we should solve the basic problems of exploration; second, we should adhere to scientific exploration procedures; third, we should have the awareness of development, efficiency, and dynamic optimization. We should highlight key points, and continue to optimize exploration deployment so as to ensure the completion of the exploration mission. To achieve high-quality exploration, the way of thinking should be changed from the traditional thinking of “heroes based on output” to that of “heroes based on benefits”. The top-level design should be done to achieve the integration of investment, benefits and responsibilities, and further improve and establish the exploration deployment comparison and selection mechanisms and a new two-level decision-making management so as to achieve the “five major changes”. With the rapid development of geophysical exploration technology and drilling and completion technology, current global oil and gas exploration is undergoing profound changes, and it is constantly developing into more detailed, deeper, broader, more difficult and more challenging fields. The faulted basins in East China, marine carbonate rocks, clastic rocks in Central and West China and shale gas will be the main areas for increasing oil and gas reserves and production. With advances in theory and technology, coalbed methane, shale

收稿日期: 2020-06-06; 修订日期: 2020-08-05。

作者简介: 马永生(1961—), 男, 博士, 中国工程院院士, 主要从事石油天然气地质研究及勘探生产实践等工作。E-mail: mays@sinopec.com。

基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金(U19B6003)资助。

oil, and oil shale are also important areas that need to be tackled and cultivated. In the future, with the rapid development of unconventional oil and gas theories, the basic system of oil and gas geology will continue to expand and improve. With the support of a new generation of intelligent technology systems for exploration and development, a conventional-unconventional overall evaluation and multi-layer exploration system of petroliferous basins will be formed, which will bring a new round of growth in oil and gas reserves and production.

Key words: oil and gas discovery; exploration technology; explorers; China

经常有业内同行专家和其他领域的朋友同我探讨如何更好、更快、更高效地找到大油气田,我很愿意和大家分享我的感受。作为一个长期从事找油事业的勘探家和地质科技工作者,我亲身经历和亲眼目睹了三十多年来大油气田的惊奇发现和高效勘探技术的惊人发展。这些大油气田的发现都伴随着地质研究的创新认识,新技术发展总是以勘探目标和地质科学为导向,包含了地质评价技术、实验室技术、钻完井及测试技术、地球物理、测井及油气藏评价技术、提高产能技术等。我和同事们有幸分享了找油找气和技术发展的辉煌成果和喜悦,也经历过失败痛苦。我们所做的工作及成就已远远超越了我开始从事地质研究和勘探工作时所能预见达到的境界。然而,我的知识和经验使我确信,找油找气没有任何捷径。

1 关于勘探家

作为勘探家首先是要坚定找到油气的信心,而对于地质家来说更重要的是在脑海里要有油气分布的基本模式。“归根到底,首先找到石油的地方正是在人们的脑海里,未发现的石油仅是作为一种想法存在于某些找油者的脑海里,如果没有人相信有更多的石油有待去寻找,将不会有更多的石油被发现”^[1]。这里,我想同大家讨论勘探家应该具备的素质问题。

大家经常说油气勘探具有“三高”的特点,即高投入、高风险、高回报,这就对勘探家提出了很高的要求。勘探家是油气勘探工作的组织者、管理者和油气勘探活动的实践者。他们多产生于地质家,但绝不等同于地质家。过去,人们长期把找油的地质家称为勘探家,这是因为油气勘探工作主要是由地质家们完成的。随着勘探工作的深入,勘探所需技术和方法越来越复杂,勘探工作所涉及的专业和学科已经远远超过了地质家所掌握的范围。大多数地质家只从事勘探某一方面的地质工作,因此也就不能笼统地将地质家称为勘探家了。根据现代勘探的要求,勘探家是掌握石油地质学及相关学科理论、熟悉勘探技术、灵活应用勘探方法、精通勘探

管理的专门人才,既是业务专家,也是管理专家。

成功的勘探家其第一个特质就是有坚定的找油信心,而且敢于实践并善于实践。勘探的真正价值在于发现,这个过程就是不断探索未知和追求真理的过程。我时常想起的一个例子就是中国古生代海相层系勘探,能有今天的场面来之不易。1922年,以美国斯坦福大学布莱克·威尔德为代表的一批西方地质家提出“中国贫油论”,认为“中国缺石油可归因于三个地质条件——中、新生代没有海相沉积;古生代大部分地层不能生成石油;除西部和西北部某些地区外,几乎所有地质时代的岩石遭受强烈的褶皱、断裂,并受到火成岩不同程度的侵入”。但一大批找油的仁人志士始终坚定在中国海相层系能找到大油气田的信念,从黔南、四川、华北到塔里木一代接着一代干。经过几十年的探索,中国古生代海相层系勘探开发取得了辉煌的战果,在塔里木、鄂尔多斯、四川盆地发现了工业性油气流,建成了油气生产基地,明确了最大的古生界海相含油气盆地——塔里木盆地、最大的古生界海相含气盆地——四川盆地。这些发现实现了几代石油人的梦想,创造了中国石油历史的辉煌,铸就了油气勘探家的精神与灵魂。

勘探家的第二个特质就是思维的敏捷性。细节决定成败,敏感性是对勘探过程每一个细节的把握和分析,麻木和不负责任是勘探活动的大敌,会使我们错失发现的机会。一颗油砂带来一个大油田的发现不仅仅是故事,而是真实的现实。油气的发现过程中充满了大量不确定因素,勘探事实一再告诉我们有些“失利”还有待再认识,勘探家在油气发现过程中不要轻言否定与放弃!勘探工作有高潮,就必然有低潮。在工作主动时,要抓住有利时机,积极准备后备领域,保持勘探工作稳定可持续发展;当勘探工作遇到挫折时,必须要有坚定的信念、百折不挠的奋斗精神和比以往更加过细的工作。

要解放思想,创新认识,创新思路,坚定勘探发展的信心。从全球油气发展现状和趋势来看,油气勘探已全面进入了以隐蔽油气藏为主的新阶段。

常规、非常规并重,油、气并重,深、浅层并重,储层复杂,成藏复杂,目标隐蔽,资源品质低,这些已成为了勘探新常态。为此,勘探家要进一步解放思想,敢于突破传统的思维定势,敢于突破已有的评价结论,敢于突破勘探禁区。要用创新的理论、开放的思维做引导,客观认识勘探发现规律,转变勘探思路,找准勘探方向,努力寻求勘探新发现。在认识不到位时不要急于打井,欲速则不达;在勘探中遇到挫折时,要坚定信心,百折不挠,认真总结失败教训,扎实做好各项基础工作,深化认识,不断探索,必然会实现新突破、新发现。

勘探顺利时要保持冷静的头脑,遇到挫折时要坚定信心,关键是思维要敏感,工作要过细。勘探活动需要理论上的坚定性和勘探实践中的敏感性相结合。理论上的坚定性是克服勘探困难和挫折的信心来源。我们有一些人对知之甚少的领域常常自我设置禁区。比如生油条件 TOC 下限、生烃死亡线、成藏门限、碳酸盐岩生烃问题等等,再有有效储层下限、油气埋藏深度屡屡被突破。人们总是高估自己已经掌握的知识(惯性思维),有些“常识”至今仍误导着我们的认识与实践。对知之甚少的领域自我设置禁区,将极大地延误油气的发现。成败决定于细节,敏感性是对勘探过程每一个细节的把握和分析,应当把方法技术问题提高到战略地位对待。没有“桥”和“路”,就无法实现战略目标。方法技术的适用性和针对性比先进性更重要,勘探活动是一个系统工程,遵循“乘法”公式,任何一个环节失败,全盘皆输。需要以优质的设计和优质的施工来确保勘探目标的实现。

勘探家的第三个特质是有“不盲从,不附和”的科学精神。1982年,当不少地质家迫于政治形势需要同意石油产量也可以翻两番的观点时,我国著名科学家翁文波院士顶着巨大的压力坚持自己的预测——2000年石油产量不是4亿吨而是1.8亿吨,这已被事实证明完全正确。真正的科学态度正如竺可桢先生所言:“不盲从,不附和”。同时,要具有实事求是、理性分析、开放合作、谦虚宽容、质疑、创新的科学精神。勘探的发现过程如此令人兴奋,正因为这是一个追求真理的过程!在一个新的地区、新的盆地,用老的方法会有新的发现;在一个老的探区,没有新的思路,肯定不会有新发现——这是勘探家的辩证思维。在找油史上曾经多次出现过这种情况,以前石油是如何被发现的知识,往往蒙住了地质家的双眼,以致于石油就在他们眼前,他们也发现不了。

勘探是实践、认识,再实践、再认识的创新性工作,贵在坚持不懈,贵在积极探索与追求。对任何事物的认识不可能一次性完成,勘探工作更是如此。只有通过反复的实践和认识,思维才能不断创新,对地下的认识才能不断提高。因此,要把握大的原则,在基本成藏条件具备的前提下,坚定信念做工作,通过坚持不懈的探索,油气勘探才能不断前进,迎来大的突破与发现。四川盆地在历经半个世纪勘探之后,发现一批超大型气田就是很好的例证。

2 关于勘探程序

油气勘探有其自身的发展规律,因此坚持科学的勘探程序就显得尤为重要,即使在快速发展的时期也要如此。经过我国油气勘探工作者长期实践,总结出“阶段不能逾越,程序不能打乱,节奏可以加快,效益必须提高”的科学勘探程序的基本原则。一个盆地、一个凹陷或者一个地区的勘探,从早期区域勘探和盆地评价开始,重点是选凹定带,明确勘探潜力和重点方向。随后进入区带评价和圈闭预探阶段,重点是明确油气聚集的重点区带,选好突破的重点圈闭实施钻探。在取得勘探发现后,迅速进入油气藏评价阶段,开展评价勘探,落实含油面积,确定油气藏类型、边界等等,提交探明储量。油气藏评价勘探阶段的结束,并不等于油气田勘探工作的结束。由于油气田的复杂性,从一个区块到另一个区块的勘探开发中,均须反复认识,多次勘探,甚至有可能当前一个区块投入全面开发后,在勘探开发后一个区块的启发下,反过来再重新勘探前一个区块的更浅或更深油气藏。实践证明,对于比较复杂的油气田,勘探工作几乎贯穿于勘探、开发的全过程。绝对不可简单地认为,油气藏评价勘探工作完成后投入开发阶段,勘探工作就全部结束了。

在勘探工作中,坚持取全、取准各项资料是勘探的基础性问题。在找油过程中要组织开展大量扎实基础工作,加强基础地质研究,深化油气成藏富集规律认识,为勘探实践提供有力指导。瞄准大盆地和富油气凹陷开展评价,对塔里木、准噶尔、鄂尔多斯、四川盆地等四大富油气盆地,加强盆地尺度整体研究,深化对油气分布基本规律的认识。要立足盆地整体重新评价认识勘探潜力。紧紧抓住构造、储层、烃源岩和成藏等关键要素,强化区带评价,优选有利目标。深化高勘探成熟区资源潜力评价、油气富集规律研究与再认识。要充分利用好已

有的勘探、开发资料,以新理论、新技术和新思路为指导,在老区勘探上要做到“三个重新认识”,即“重新认识勘探历程,重新认识资源潜力,重新认识勘探目的层”,明确勘探重点,理清勘探思路,努力实现新突破。在老区研究上要做到“多个精细”,如“沉积相带精细、储层预测精细、圈闭描述精细”等。

我始终强调勘探井位是转变思路、扎实严谨取得的结果。回顾总结众多盆地的勘探历程,深切体会到勘探思路的转变与勘探技术的发展是油气田发现的关键。四川盆地勘探思路经历了3次飞跃,由此也带来了3次勘探的大发现。第一次飞跃表现在对盆地资源赋存状态上,通过三上龙门山、四上海棠铺,三次川中大会战,明确了盆地油少气多的现实,明确了碳酸盐岩与天然气两个主要勘探目标;第二次飞跃表现在对碳酸盐岩储层性质的认识上^[2-3],逐步认识到裂缝在储层中的贡献,相应发展了一系列裂缝评价技术,促进了勘探的发展;第三次飞跃表现在对于构造—岩性复合型圈闭的认识上,主要是对石炭系黄龙组、三叠系飞仙关组、二叠系长兴组等重要孔隙性储层的认识上,带来了勘探大发展。

坚持勘探程序的同时,更要突出重点,持续优化勘探部署,确保完成勘探任务。要把部署优化贯穿于勘探实施的全过程。在优化上要体现“三个意识”。第一要体现发展意识,要从油气田可持续发展的全局谋划勘探工作,综合分析和考虑近期和中长期发展的总体要求,部署上要真正做到吃一、拿二、观三。要在展开、突破和准备三个层次协调安排,统筹好地震、钻井工作量部署,有序推进。风险勘探要突出目标的战略意义、导向意义、资源规模;圈闭预探要突出油气新发现、增储意义;评价勘探要突出商业发现,规模增储、储量的可动用性、勘探开发结合。第二要体现效益意识,要把投资、工作量、储量、控制储量发现成本、勘探损益率有效统一起来。预探井取得发现后,要加强勘探开发结合,对开发不跟进的慎重部署勘探评价井,对邻区同类型圈闭也暂时不部署预探井。评价勘探项目在实施过程中,如果发现油气藏变化大、储量规模及品质明显变差,与部署方案差异大,不能实现有效开发时,要及时调整部署方案和项目。第三要体现动态优化意识。油气勘探面对的地质对象异常复杂,不确定性因素多。部署方案是靠我们的知识、经验和现有技术手段来制定的,前期评价研究再深入,在具体实施中也可能会出现新情况、新问

题。这几年在川东北、川西等地区相继取得勘探的大发现,一个重要的原因就是,“三个重新认识”奠定了勘探不断发展与突破的哲学思想基础——重新认识四川盆地突出解决了勘探前景与主攻方向的问题,坚定了大突破、大发现、大发展的信心与决心;重新认识沉积相突出解决了关键与瓶颈地质问题;重新认识自己突出解决了积极进取的精神状态问题。因此,加强部署实施的跟踪显得尤为重要。要把跟踪评价工作抓实,善于把握勘探发展方向,发现实施中出现的细微变化,及时总结分析,及时提出调整方案。面对低油价带来的前所未有的挑战,面对加快油气勘探、推进结构调整的新要求,我们要增强加快勘探突破的紧迫感和责任感,以创新的思维、严细的作风,切实做到研究认识深化深化再深化,目标评价精细精细再精细,部署优化优化再优化,就一定能取得大突破,推动勘探提质增效迈上新台阶。

3 关于高质量勘探

面对勘探成本越来越高的局面,特别是低油价时期,要实现可持续发展,我们应当树立以经济效益为中心的发展理念,走高效勘探开发之路,要更加重视资源获取,更加重视靠技术驱动,更加重视高效益、有质量的发展。在勘探开发工作中,要突出储量替代率、储量转化率和桶油发现成本。不仅要把油气储量做大,更要做优。如何走这高效勘探之路?我的体会会有如下几点:

第一是所有勘探人员、技术人员都要有经济效益的观念。无论是搞地下研究的,搞地面工程的,还是搞勘探部署的,所有的人都要有经济效益的概念。第二是从勘探角度来说,特别是新区新领域来说,要走符合高效发展规律的道路。新区域不能过早集中勘探,一定要做好基础研究,一定要把研究工作做到前面。研究是基础,物探要先行。在西部基本是深层、复杂地区,没有物探的基础,靠钻头是干不起来的。第三是要提高管理水平。把分段的费用,精确计算和管理。降低成本不是降低定额费用,而是提高效率,这是降低成本的最好办法。要求勘探上加大推进新区突破,降低发现成本,改进考核机制,提高勘探效益。要立足大盆地,争取大突破,寻找规模储量。要改善储量考核办法,把上市储量替代率作为勘探主要指标。要求开发上努力提高储量动用率,推进勘探开发一体化,加强规模建产,使产能、工作量与投资增长匹配,提高规模效益。

要实现高质量勘探,做好顶层设计很重要。在指导思想上要始终坚持以效益为中心;在部署上要深化地质综合研究,把握规律,择优部署,提高成功率;在组织实施上要推广先进实用的技术,抓好每一个环节,打一口井成一口井;要强化勘探与开发的有机结合,抓好关键衔接点,注重整体效益。要研究物探、预探和评价勘探的工作量、投资的合理结构;研究石油勘探、天然气勘探工作量、投资的合理结构;研究新区、老区勘探的合理结构,保障勘探健康有序可持续发展。要加强勘探全过程经济评价,实现预探目标、储量品质和结构的优化。要创新机制。总体目标是明确责任主体,实现投资、效益和责任三统一。推荐的基本模式是勘探中心加项目管理部,实现工作量、投资、储量、成本、效益一体化管理。勘探中心是勘探责任主体,对勘探工作实行统一管理;项目管理部为勘探中心派出单位,负责现场实施,随项目而设立,项目完成即解散。要结合实际,因企制宜,积极推进。

要进一步完善与建立勘探部署比选机制和两级决策的管理新机制。要进一步完善统一评价优选机制。股份公司层面要完善圈闭、预探井统一优选平台,建立地震部署统一优选平台和勘探评价项目统一优选平台;企业层面要完善勘探评价井统一优选平台,新建勘探评价项目统一优化平台。要借鉴预探圈闭的评价思路,初步考虑按预测储量可靠性、储量品位、储量可升级性及储量价值等评价参数,进行油气藏早期评价项目统一优选排队。新建地震部署统一优化平台。地震部署也要突出效益。把地震部署区块资源规模、技术可行性、发现及落实圈闭个数等作为评价优选地震区块的基本要素。预探井及物探部署方案由总部统一论证,优选决策;评价井部署方案由企业组织论证,优选决策。组织统一论证优选,成熟一批,论证一批,下达一批。做到井位、工作量、投资、预测储量指标、成本统一,努力从源头降低勘探风险。

面对油田板块新常态,面对低油价下暴露的深层次矛盾,要立足于增强内涵发展能力,痛下决心,加快转变发展理念,坚决做到“五大转变”,即油气勘探要从突出油气发现向突出商业发现转变、从重视储量数量向重视储量质量转变、油田开发要从以产量为中心向以产效益油为中心转变、技术进步要从指标创新向技术创效转变、思维方式要从传统的“以产量论英雄”思维向“以效益论英雄”思维转变。在实际工作中,油气勘探要严格执行“三不打”,即不具备战略引领意义的风险井坚决不打、

圈闭不落实的预探井坚决不打、不新增商业开发储量的评价井坚决不打。

4 关于近期勘探的四大领域

当前我国要实现“原油硬稳定,天然气快上产”的局面,油气勘探应主要集中在以下4个领域重点开展研究与技术攻关。

4.1 东部断陷盆地

根据 IHS Markit 公司分析评价^[4],我国松辽盆地、渤海湾盆地是全球油气超级盆地,这类盆地发育多套有效烃源岩、多套储层叠置和多种类型油气藏,剩余资源潜力十分可观。同时,我国东部断陷盆地地面系统配套好,具有勘探发现后资源快速转化的优势,是低油价下实现“原油硬稳定”的重中之重。当前东部断陷盆地已由构造圈闭勘探转向隐蔽油气藏勘探,储量发现规模越来越小,从2013年来,松辽、渤海湾盆地陆上已经连续7年未发现探明5000万吨规模以上的整装油田。“精细勘探”已经成为大家的共识,重点要做好四个方面的精细研究:一是要开展精细沉积研究,分小层精细划分沉积微相;二是要开展精细构造研究,通过井震联合精细统层,建立高精度速度场、细分层精细构造解释成图;三是要开展精细储层预测,分层刻画砂体;四是要精细成藏分析,尤其是前期导致钻探失利主要成藏要素的精细分析。

在加强东部断陷盆地剩余油气资源分布研究的同时,要加强断陷盆地油气成藏过程中的差异富集机理研究。首先还是要转变勘探思路,充分利用老油田形成的海量数据,利用大数据等新技术、新方法重新认识盆地,大力加强“三新”(新区带、新层系、新类型)勘探;同时要深化石炭系—二叠系等前第三系油气资源研究,对中深层天然气资源进行探索。在工程技术方面,地震勘探技术要进一步提高地震资料分辨率、提高成像精度,同时要经济适用,满足精细勘探的需求;钻完井方面,要针对复杂断块、薄互层砂体等储层类型,对大位移井、水平井精细轨迹控制优快钻井技术、低渗透储层改造及油层保护综合配套技术开展攻关。

东部断陷盆地页岩油资源,是十分重要的战略接替资源。美国二叠纪盆地自1921年钻出第一口工业油流井以来,早期常规油气经历储产量上升、稳定、递减周期,通过勘探理念的革新,实现了从常规油气勘探为主向页岩油气勘探为主的转变,使盆地储产量再次“焕发青春”。我国陆相页岩油地质特征与北美相比存在较大差异,早期借鉴北美经验

开展页岩油攻关,普遍存在“压不开、撑不住、返排低、稳产难”的现象。近期加大陆相页岩可动油、可压裂性等方面的基础研究,明确咸化湖盆纹层状页岩相是最有利岩相,具有中高成熟度、异常高压的陆相有利区是近期页岩油攻关的主要目标。针对陆相页岩相变快、黏土含量高、塑性强的特点,攻关并初步形成了页岩油“甜点”地球物理预测方法和陆相页岩油工程工艺技术系列,近期在渤海湾盆地黄骅拗陷沧东凹陷、济阳拗陷相继取得陆相页岩油重大突破。下一步要借鉴北美在低油价时期形成的页岩油“甜点”识别新思路,利用大数据优化工程工艺技术等新方法,研发旋转导向、智能钻机及配套工具装备,以提高钻井、压裂生产效率为主线,持续降低钻完井成本。加大新材料应用,加大二氧化碳压裂、中低层成熟度页岩油原地转化等新型技术研发,实现页岩油低油价下规模开发,实现东部老区原油硬稳定的根本性目标。

4.2 海相碳酸盐岩

海相碳酸盐岩油气田具有规模整装、资源丰度高的特点,总体处于大发现、大发展阶段,是近期我国大油气田发现的重要领域。塔里木、四川、鄂尔多斯盆地是海相碳酸盐岩大油气田发现的主战场^[5-9]。

针对海相碳酸盐岩油气勘探,在地质研究上要从构造—沉积充填背景分析入手,深化地层沉积、层序地层研究,明确古裂陷、古隆起等分布范围,重点落实塔里木盆地寒武系,四川盆地寒武系、志留系、二叠系,鄂尔多斯盆地奥陶系平凉组、寒武系等多套主力烃源岩的发育特征与分布范围。针对储层研究,除了生物礁滩、古喀斯特岩溶、白云岩、裂缝型储层外,近年来还发现走滑断裂主控的断溶体^[10-11]、微生物岩以及与热液作用相关的硅化碳酸盐岩、灰泥灰岩等新类型。上述储层在沉积、成岩、成储过程中均受沉积—成岩环境、构造—压力耦合作用、流体—岩石溶蚀和沉淀作用的共同控制,但在不同地区、不同埋藏环境下,优质储层形成的地质主控因素差异很大。因此要加强新类型储层的表征研究,从沉积、成岩、构造、流体之间的相互耦合关系入手,开展储集空间形成、发育与保持机理研究,形成优质储层发育模式,指导储层预测。针对海相油气藏经历多期构造改造的特点,要从“多元、多期生烃”角度,从动态成藏、调整的角度,加强典型油气藏的成藏过程解剖,形成深层、超深层油气成藏规律认识^[12]。在关注塔里木盆地奥陶系、寒武系、四川盆地中三叠统一震旦全层系、鄂尔

多斯盆地奥陶系、寒武系评价的同时,也要关注华北地区前寒武系、羌塘盆地、中国南方海相勘探潜力评价。

针对勘探目的层埋藏深、储层非均质性强的难点,要加强复杂地区超深层碳酸盐岩三维地震采集、处理攻关,解决超深层地震资料信噪比低、碳酸盐岩内幕成像精度不高的问题^[13-14]。要地质、测井、地震、非震多种手段相结合,解决储层预测存在多解性的问题。针对深层、超深层高温、高压环境,要加大超深层装备的攻关力度,在超深层钻井关键装备、高温井测录井工具、完井装备等方面取得突破,为勘探突破提供技术保障。

4.3 中西部盆地碎屑岩

中西部盆地碎屑岩油气藏受盆地多期构造旋回影响,具有成藏期次多、油气运聚方向复杂的特点。根据油气藏所处构造背景,可以分为陆内拗陷和山前带2种类型。陆内拗陷类型,以鄂尔多斯盆地、四川盆地致密砂岩气藏为代表,往往具有分布面积广、储量规模大、非均质性明显的特点。寻找“甜点”是一个重要方向。首先在明确烃源岩分布范围的前提下,要加强砂体储层精细建模研究,从砂体中找“甜点”。研究表明不同沉积环境下的砂体储集性存在差异性。单个砂体由于水动力条件的不同,在砂体不同位置孔渗特征也有差异性,要开展精细的储层建模研究,找出不同类型砂体高孔、高渗储集体分布规律。二是要提高地震分辨率,加强砂体精细描述、裂缝预测的技术攻关,形成有效“甜点”预测技术。三是要借鉴页岩气的相关经验,加强地质工程一体化,加强薄砂体水平井、定向井井眼轨迹控制、直井多层压裂、低成本水平井分段压裂的攻关工作。

针对山前带碎屑岩勘探,地震勘探技术攻关是勘探突破的关键,在已经取得勘探突破的山前带地区,均是由于攻关获得了高质量的地震成像资料。同时针对山前带地层产状复杂、破碎、漏失、高压工程等难题,开展优快、安全钻完井、深层高破裂压力、复杂储层改造技术攻关,为勘探突破提供技术保障。

4.4 页岩气

截至2019年,勘探家们已在四川盆地志留系龙马溪组取得近2万亿方的探明储量,形成153亿方的页岩气产量。针对我国地层时代老、经历多期构造改造的海相页岩气勘探,已经形成了以沉积学研究确定有利区,以保存条件研究确定有利目标,开展可压裂性研究确定水平井层位、轨迹,评价优

化工程设计,最终取得勘探突破的工作思路。在勘探早期通过沉积、有机地化研究,首先是明确富有机质页岩的时空分布范围,这包含 2 个方面:一是要明确在地层中连续高含 TOC 页岩段以及矿物组成;二是在明确高含 TOC 页岩段平面上的变化规律,包括高含 TOC 页岩段厚度、TOC 值、矿物组成变化等。在此基础上,结合区域构造、工程实施条件等明确页岩气勘探有利区。在页岩气勘探有利区优选目标时,保存条件、工程实施条件成为目标优选重点考虑主要因素。保存条件要对评价目标区的区域构造进行研究,在二维、三维地震资料解释的基础上开展精细构造解释,开展构造埋藏史、断裂、裂缝组合、断裂封堵性等研究,同时兼顾工程实施能力优选上钻目标。钻探目标确定后,获得高 TOC 集中段的有机地化、岩石物理资料以开展可压裂性评价是优选水平井靶窗层位的关键。水平井靶窗的选择是页岩含气性与可压裂性综合评价的结果,也是页岩气井获得高产的关键。水平井轨迹设计时,地质家要密切和工程专家结合,根据现今应力方向、构造精细解释与裂缝预测确定水平井方向和长度,并确定水平井轨迹控制点。在水平井钻探过程中,地质家要根据前期研究明确的靶窗测井标志,与工程专家一块及时调整水平井轨迹,确保水平井在预定层位穿行。水平井完钻后,地质家要在明确水平井穿行层位的基础上,结合小层可压裂性研究认识以及钻井、地震对裂缝的解释,与压裂工程专家共同确定压裂分段、各段压裂施工参数。精细页岩地质特征描述、精细构造特征解释、地质工程一体化结合,开展工程方案精细设计,是页岩气取得勘探突破的关键^[15]。

在持续扩大五峰—龙马溪组勘探成果的同时,要积极推进四川盆地及周缘寒武系、二叠系、侏罗系等新层系和北方石炭系—二叠系、黔南—桂中地区石炭系—泥盆系及中下扬子等新区带页岩气的发现。针对海相页岩新层系页岩气勘探要借鉴五峰组—龙马溪组勘探成功经验^[16-17],从沉积分析入手,明确富有机质页岩纵向“甜点段”和平面的沉积有利区;总结五峰组—龙马溪组页岩保存条件影响关键因素,分析多期构造作用对新层系优质页岩富集作用的影响,结合构造特征、埋深等条件,明确有利勘探目标。要加强可压裂性评价,优选水平井穿行层位、优化水平井及后期压裂设计方案,确保最终“临门一脚”效果。针对侏罗系等陆相、海陆过渡相泥页岩纵向岩性组合复杂、平面岩性变化快、黏土含量高特点,从系统取心入手,加强泥页

岩层序沉积等基础研究工作,结合岩石力学分析,找出地质—工程双“甜点”。同时要加大以陆相页岩变化特征描述为核心的地球物理“甜点”预测技术、针对塑性地层特点的适应性压裂技术的攻关。

5 关于油气勘探发展展望

随着页岩油气的兴起以及地球物理勘探技术与钻、完井技术的迅猛发展,当前全球油气勘探正经历着深刻变化,并不断向更细、更深、更多样的领域发展。由浅、中层向深层、超深层,由浅水到深水、超深水,由常规油气资源向非常规油气资源不断拓展,深层、深水、非常规已经成为世界油气勘探发展的新趋势。近十年油气勘探成果表明,深水、超深水领域占全球油气新发现储量的半数以上,重点分布在中—南大西洋两岸、东非海域、东地中海等盆地。北美地区非常规油气新增储量占全球油气新增储量的比重逐步增大,2017 年已接近 45%。同时值得注意的是,在勘探程度高的老油区中的新领域、新层系、新类型的连续新发现,也使得老油区的勘探再次活跃起来,正在成为油气勘探应对低油价的一个新亮点。陆相页岩油正成为勘探热点,应用长水平段水平井分段压裂技术,中、高成熟页岩油已在准噶尔、渤海湾、松辽、四川、三塘湖等盆地相继取得突破。中国东部成熟盆地精细勘探取得新发现,渤海湾盆地陆上和海域潜山油藏、深层深洼带勘探实现多点突破,成为东部油气资源有效接替的重要领域。

在石油地质基础理论研究方面,非常规油气理论研究进展正推动常规油气理论研究的进一步深化。烃源岩研究由生烃高峰期研究,向生烃全过程扩展;储层研究方面,纳米测试技术由泥页岩向砂岩、碳酸盐岩常规储层拓展,从米级到纳米级多个尺度描述储层物性,探讨流体在多个尺度孔径中的渗流特征;在盖层、保存条件研究方面,随着泥页岩微观结构、微裂缝形成机理研究不断深入,对盖层的破坏与封堵机制正在形成新认识;成藏规律研究更关注烃源岩生排烃与不同类型储集空间的全过程耦合。可以预期非常规油气地质理论将对石油天然气地质基础理论体系进行拓展,并赋予新的学科内涵。未来油气勘探将是对含油气盆地常规、非常规整体开展评价研究,剖析常规、非常规多类型油气资源在空间上的分布规律,提出多层系立体勘探的格局。与此同时,随着新一代基于纳米科技、智能材料、人工智能等技术引入油气工业,油气工程技术将向智能化、一体化、微型化、低成本方向发

展,以智能化精确导向为主导的高效、低成本钻、完井技术体系、原位改质等新一代勘探开发智能化技术体系正在形成,将助推油气工业迎来新一轮油气储、产量增长高峰。

参考文献:

- [1] PRATT W E. Toward a philosophy of oil-finding[J]. AAPG Bulletin, 1952, 36(12): 2231-2236.
- [2] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 深层、超深层碳酸盐岩油气储层形成机理研究综述[J]. 地学前缘, 2011, 18(4): 181-192.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong. The research status and advances in porosity evolution and diagenesis of deep carbonate reservoir[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(4): 181-192.
- [3] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等. 深层超深层碳酸盐岩优质储层发育机理和“三元控储”模式: 以四川普光气田为例[J]. 地质学报, 2010, 84(8): 1087-1094.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong, et al. Formation mechanism of deep-buried carbonate reservoir and its model of three-element controlling reservoir: a case study from the Puguang Oilfield in Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(8): 1087-1094.
- [4] 吕建中, 刘嘉, 孙乃达, 等. “超级盆地模式”: 成熟盆地油气增储上产新思路[J]. 国际石油经济, 2019, 27(9): 40-48.
LV Jianzhong, LIU Jia, SUN Naida, et al. The “Super Basin Model”: a new idea of increasing reserves and production in mature basins[J]. International Petroleum Economics, 2019, 27(9): 40-48.
- [5] 周进高, 刘新社, 沈安江, 等. 中国海相含油气盆地构造—岩相古地理特征[J]. 海相油气地质, 2019, 24(4): 27-37.
ZHOU Jingao, LIU Xinshe, SHEN Anjiang, et al. The characteristics of tectonic-lithofacies paleogeography of marine petroliferous basins of China[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2019, 24(4): 27-37.
- [6] 马永生, 蔡勋育, 郭旭升, 等. 普光气田的发现[J]. 中国工程科学, 2010, 12(10): 14-23.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, GUO Xusheng, et al. The discovery of Puguang Gas Field[J]. Engineering Science, 2010, 12(10): 14-23.
- [7] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等. “川气东送”工程资源基础与前景[J]. 中国工程科学, 2010, 12(5): 73-77.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong, et al. The gas resources of the “Gas Pipeline from Sichuan to China Eastern Region” project[J]. Engineering Science, 2010, 12(5): 73-77.
- [8] 赵路子, 汪泽成, 杨雨, 等. 四川盆地蓬探1井灯影组灯二段油气勘探重大发现及意义[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 1-12.
ZHAO Luzi, WANG Zecheng, YANG Yu, et al. Important discovery in the second member of Dengying Formation in well Pengtan1 and its significance, Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 1-12.
- [9] 马永生, 何登发, 蔡勋育, 等. 中国海相碳酸盐岩的分布及油气地质基础问题[J]. 岩石学报, 2017, 33(4): 1007-1020.
MA Yongsheng, HE Dengfa, CAI Xunyu, et al. Distribution and fundamental science questions for petroleum geology of marine carbonate in China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(4): 1007-1020.
- [10] 漆立新. 塔里木盆地顺北超深断溶体油藏特征与启示[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 102-111.
QI Lixin. Characteristics and inspiration of ultra-deep fault-karst reservoir in the Shunbei area of the Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 102-111.
- [11] 焦方正. 塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(2): 207-216.
JIAO Fangzheng. Significance and prospect of ultra-deep carbonate fault-karst reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(2): 207-216.
- [12] 何登发, 马永生, 刘波, 等. 中国含油气盆地深层勘探的主要进展与科学问题[J]. 地学前缘, 2019, 26(1): 1-12.
HE Dengfa, MA Yongsheng, LIU Bo, et al. Main advances and key issues for deep-seated exploration in petroliferous basins in China[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(1): 1-12.
- [13] 马永生, 黎茂稳, 蔡勋育, 等. 中国海相深层油气富集机理与勘探开发: 研究现状、关键技术瓶颈与基础科学问题[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(4): 655-672, 683.
MA Yongsheng, LI Maowen, CAI Xunyu, et al. Mechanisms and exploitation of deep marine petroleum accumulations in China: advances, technological bottlenecks and basic scientific problems[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 655-672, 683.
- [14] 马永生, 张建宁, 赵培荣, 等. 物探技术需求分析及攻关方向思考: 以中国石化油气勘探为例[J]. 石油物探, 2016, 55(1): 1-9.
MA Yongsheng, ZHANG Jianing, ZHAO Peirong, et al. Requirement analysis and research direction for the geophysical prospecting technology of SINOPEC[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016, 55(1): 1-9.
- [15] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 石油工程技术对油气勘探的支撑与未来攻关方向思考: 以中国石化油气勘探为例[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(2): 1-9.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong. The support of petroleum engineering technologies in trends in oil and gas exploration and development: case study on oil and gas exploration in SINOPEC[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(2): 1-9.
- [16] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 中国页岩气勘探开发理论认识与实践[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 561-574.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong. China's shale gas exploration and development: understanding and practice[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 561-574.
- [17] 孙焕泉, 周德华, 蔡勋育, 等. 中国石化页岩气发展现状与趋势[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2): 14-26.
SUN Huanquan, ZHOU Dehua, CAI Xunyu, et al. Progress and prospect of shale gas development of SINOPEC[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 26(1): 1-12.