

加强多学科交叉融合研究 推动中国海相深层油气勘探开发新突破

■马永生

中国海相深层油气主要分布在塔里木、四川和鄂尔多斯三大盆地中。塔河、普光、安岳等油气重大发现,展示出中国海相深层具有广阔的油气勘探开发前景。加强海相深层油气的多学科交叉融合基础研究,是“加大国内油气勘探开发力度、保障国家能源安全”七年行动计划之重要组成部分。

全球油气勘探开发的大趋势

深层、深水和非常规是全球油气发展的主要方向,坚持高效勘探和效益开发是油气产业可持续发展的必然选择。深层油气资源是近十年全球探明储量的增长主体,不断突破有效资源保持深度下限。2008~2018 年,全球在 4000 米以深地层新增油气探明储量 234 亿吨油当量,超过同期全球新增油气储量的 60%,油气钻探最大深度达到 12869 米。

深水成为近期油气增储重点,重大发现主要集中在大西洋两侧、东非、地中海等被动陆缘盆地。2008~2018 年,全球海域油气探明储量 217 亿吨油当量,占全球新增油气探明储量 68%,其中深水—超深水占全球新增可采储量 40%以上。

油气资源劣质化趋势明显,非常规将成为未来全球油气发展的重要领域。在全球 5 万吨油当量可采油气资源总量中,常规与非常规的比例约为 1:4,预计 2040 年石油和天然气年产量将分别超过 50 亿吨和 5 万亿方,其中非常规油气产量分别占石油和天然气年产量的 15.2%和 32.6%。

目前,天然气作为能源转型的主要过渡型资源越来越受到重视,深层、深水和非常规成为全球油气勘探的重点。多种类型碳酸盐岩(深水、深层、盐下、致密等)、被动陆缘海相油积岩、复杂山前带、深层页岩油气,将成为未来全球油气勘探的重大突破领域。

2014 年以来,国际油价长期在中低位波动,特别是今年以来新冠肺炎疫情和油价暴跌叠加影响,对全球油气企业生产经营的冲击前所未有。在传统油气勘探工作基础上加入商业运作模式的综合勘探开发模式在过去取得了巨大成功,也是油气公司今后生存和发展的必然选择。

国际油气公司应对低油价策略,一是优化投资,更加突出战略领域风险勘探,促进深水、深层规模资源发现;二是技术为王,更加突出技术在降低发现成本、提高竞争力上的作用,大力发展低成本技术,信息化、智能化、大数据等全面进入油气领域;三是战略重组,更加突出主业发展,把技术、资金等聚焦到富油气盆地、提高竞争力上的作用,大力发展低成本技术,信息化、智能化、大数据等全面进入油气领域;三是战略重组,更加突出主业发展,把技术、资金等聚焦到富油气盆地、提高竞争力上的作用,大力发展低成本技术,信息化、智能化、大数据等全面进入油气领域。

中国油气勘探开发呈现新特点

中国石油勘探总体处于中期发展阶段,天然气勘探处于早中期阶段。2000 年以来,中国油气勘探取得了六个方面的重要进展。

一是中西部盆地向深层发展。在塔里木、四川、鄂尔多斯盆地 4500 米以深的深层海相碳酸盐岩和准噶尔盆地二叠系碎屑岩不断取得突破,发现了塔里木盆地的塔河等十多个油气田、克拉苏等气田,以及四川盆地的普光、元坝、安岳等多个大气田。

二是叠合盆地向复杂山前带攻关。塔里木盆地天山山前带、准噶尔盆地准南及淮北、准东山前带、四川盆地龙门山前带、米仓—大巴山前带勘探,取得以库车前陆冲断带和川西须家河组为代表的中国深层致密砂岩气大发现。

三是台盆地加强走滑断裂带油气勘探。近年来在塔里木盆地古隆起之间的低隆、斜坡区走滑断裂带相继实现顺南、顺北、顺北等重大油气发现。在准噶尔盆地中部、渤海湾和鄂尔多斯盆地,这类目标也有望成为增储建产的接替领域。

四是 3500 米以深的深层页岩气勘探领域进一步扩大。随着涪陵、长宁—威远、昭通等国家页岩气示范区建成,中

国石化进军深层页岩气并在威荣地区取得重大突破,近期在新层系、新类型和新盆地也获得深层页岩气勘探重要进展。

五是陆相页岩油初步成为勘探热点。应用长水平段水平井分段压裂技术,中高成熟页岩油在准噶尔、渤海湾、松辽、四川、三塘湖、江汉等盆地取得局部突破。与此同时,已经着手探索资源规模更大的中低成熟页岩油开采技术路线。

六是中国东部成熟盆地精细勘探获得新发现。近年来,渤海湾盆地陆上和海域潜山油藏勘探实现多点突破,逐步深化了潜山油藏的地质认识。断陷盆地深层注脂带及古潜山内幕储盖组合成为东部油气资源有效接替的重要领域。

经过近二十年的工作实践,中国石油勘探开发实现了稳定发展,天然气勘探开发实现了跨越式发展,深层、深水和非常规已成为未来油气发展的重要领域。此外,勘探对象复杂化和资源品位劣质化,成为中国油气勘探开发的新特点,也给油气产业发展带来许多新的挑战。

中国油气勘探开发发展战略必须坚持“资源导向”与“技术导向”并重,将中西部新区、新领域、中深层作为常规油气规模勘探的主要战场,将东部盆地“三新”领域和低品位资源作为持续增储的潜力方向,将非常规油气作为增储上产的战略接替领域,把地质理论创新和工程技术装备研发作为高效勘探和效益开发的核心。

深层—超深层将成重点突破领域

中国深层油气资源潜力巨大,但探明程度低,是未来油气勘探开发的现实领域。根据 2015 年全国油气资源评价结果,全国深层—超深层油气资源为 763 亿吨油当量,占全国油气资源总量的 35%,而探明程度不到 15%,还存在巨大的勘探潜力。

塔里木、四川和鄂尔多斯盆地的海相深层碳酸盐岩油气是最重要的突破领域。塔里木盆地 4500 米以深的深层—6000 米以深的超深层油气主要赋存于台盆地海相深层、库车陆相、塔西南克拉通—前陆叠合型等三大勘探领域,而台盆地勘探对象主要为寒武系—奥陶系碳酸盐岩和志留系—中新生界碎屑岩。四川盆地经历多旋回构造运动,发育两期克拉通内大型裂陷和 5 个大型不整合面,海相深层油气勘探对象主要位于古隆起斜坡区、台缘高能相带—海槽边缘带、大型不整合面和川北—川中地区奥陶系新磨擦层系。

3500 米以深的深层页岩气是中国海相油气勘探的另一个重点突破领域。目前仅在四川盆地及其周缘的五峰组—龙马溪组页岩中实现了规模化商业开发。除此之外,塔里木和鄂尔多斯盆地也存在未来深层页岩气勘探领域。

探究基础地质问题

第一,克拉通盆地的形成与演化机制。

经过中国几代地质学家的艰苦探索,特别是通过高精度地球物理成像,先后落实了盆地基底性质和构造格架,重建了盆地演化动力学过程,提出了中国海相盆地的多种叠合盆地类型,构建了四川、塔里木等不同地质历史时期的盆地原型,建立了南方、鄂尔多斯等盆地的沉积充填模型。近 10 多年针对四川盆地中部震旦纪—早寒武世裂陷槽、鄂尔多斯盆地中晚元古代裂谷、塔里木盆地南华—震旦纪裂谷和寒武—奥陶纪“满加尔坳拉槽”模型研究,为中国海相克拉通盆地构造分异提供了有力的佐证。然而,海相盆地边缘相带后期造山变形和改造破坏,加大了残留小型克拉通原型盆地恢复与沉积相带分布预测的难度。因此,需要针对不同盆地构造—沉积耦合特点,加强克拉通盆地早期裂陷成因机制与主控因素、构造沉积分异机制和古老碳酸盐岩层系油气保存条件研究。

第二,烃源岩的分布及其成烃过程。中国海相深层烃源岩主要发育于古生界,处于塔里木、鄂尔多斯、四川等叠合盆地的深部含油气组合中,包括克拉



2014 年 8 月 14 日,涪陵工区规模最大、设备使用最多、合计压裂层数最多、注入总流量最大的一次井工厂同步压裂施工,在焦页 42 号平台正式启动。



普光礁滩气藏预测图

普光天然气净化厂

通边缘带陷优质黑色页岩、克拉通内拗陷层状富含有机质碳酸盐岩以及克拉通内宽广拗陷沼泽相烃源岩。前震旦纪稳定陆壳背景及其伴随的低热流低地温梯度特点,延缓了克拉通盆地中下古生界及震旦系油气转化进程,而巨厚中新代沉积物覆盖又有利于天然气形成和保存。由于中国三大海相盆地不同主力烃源岩层系在生烃中心空间叠置关系上的不同,带来了不同盆地油气富集层位和勘探主力目的层的差异性。在烃源岩分布和成烃演化研究方面,需要针对四川南塔里木盆地多层系、多期次、多元供烃的特点,开展烃源岩的有利沉积相带、鉴别标志、有效成熟度指标以及有效性评价标准等研究;拓展高一过成熟烃源岩成烃母质的识别、生烃潜力恢复与评价研究;进一步明确塔里木盆地寒武统玉尔吐组、鄂尔多斯寒武系—奥陶统和四川下寒武统筇竹寺组烃源岩的有效性。

第三,碳酸盐岩沉积和成岩作用。中国海相深层碳酸盐岩集中分布在四川、塔里木、鄂尔多斯和华北断陷盆地及周缘造山带的中—新元古界到三叠系。受盆地基底活动差异性影响,沉积充填演化序列变化很大,而且在克拉通边缘形成多种类型的碳酸盐岩台地边缘。

随着深层油气勘探的突破,逐渐认识到原生粒间孔和近地表次生溶蚀孔对深部储层的重要作用。碳酸盐岩油气勘探的方向就是寻找优质沉积相带和有利孔隙保存的成岩演化环境。因此需要在层序地层格架内,根据地震和测井资料,来有效预测盆地深部覆盖区不同碳酸盐岩相的分布范围;并根据整体地质演化过程中环境条件的变迁,解释碳酸盐岩自沉积至今的岩石—流体耦合关系及其对储集空间的改造作用。要进一步研究碳酸盐岩台地的构造—沉积分异作用,厘清构造沉积分异的机制。碳酸盐岩台地—台盆发育规律及其对礁滩发育的控制机制;继续探索白云岩成因,明确白云岩化主控因素,建立定量预测模型;重点关注古老生物礁和微生物岩问题,形成对勘探有指导性的发育成因模式和分布预测模型。

第四,深层碳酸盐岩储层的成因与分布预测。针对中国小克拉通盆地碳酸盐岩形成地质特点,在实践中中国石化研究团队提出了优质储层形成的“三元控储”模式,强调台地边缘高能礁滩、潮缘滩和潮间云坪等沉积成岩环境控制早期孔隙发育、构造—压力耦合控制裂缝和溶蚀作用、流体—岩石相互作用控制深部溶蚀与孔隙保存。需要针对克拉通盆地发育多类型储层、多类型岩溶等特点,加强构造—岩相古地理重建与碳酸盐岩台地精细刻画、储层沉积发育主控因素与定量模型、超深层白云岩储层成因模式、储层

成因模型指导下的储层预测与地球物理识别方法、储集空间形成与油气充注时空关系、膏盐层对储层体形成和油气聚集作用等基础研究。

第五,海相碳酸盐岩油气成藏机制与分布规律。

典型油气藏解剖结果表明,中国三大海相盆地碳酸盐岩层系存在多种油气成藏模式,其中礁滩储集体型、潜山风化岩溶储层型和隆起斜坡区岩溶储层型模式有利于大面积油气成藏。对比研究发现,四川盆地深层油气分布主要受“拉张槽、古隆起与盆山结构”控制,塔里木盆地主要受古隆起岩溶斜坡带控制,而鄂尔多斯盆地主要受源储配置关系控制。进一步深化研究,需要针对深层烃源(岩)分布的不确定性,探索源—储耦合关系判识方法;针对油气多期成藏和调整改造的特点,加强对油气生—运—聚—散全链条成藏动力学过程追踪;针对油气成藏空间强非均质性,加强对复杂油气藏成藏要素、事件及其关键控制条件刻画;透过现象看本质,进一步把握碳酸盐岩油气分布的内在规律。

第六,海相深层页岩气富集机理与分布规律。

近期四川盆地页岩气产量能否实现快速增长,关键在于 3500 米以深五峰组—龙马溪组页岩气能否实现大规模商业开发。加强页岩气储层小层精细对比、构造精细解释和裂缝有效预测、深层页岩含气性—赋存条件—可压性研究,是揭示川南深层页岩气富集高产规律和工程技术攻关的基础。

优先解决基础理论认识问题

目前,中国海相深层油气勘探开发面临着许多理论和技术难题,破解这些难题的关键在于优先解决海相深层油气勘探的基础理论认识问题。

一是海相深层油气资源潜力与分布问题。中国海相深层已发现的油气田主要分布在三大盆地古生界,主力烃源岩层系认识基本落实。随着四川盆地上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩气开发带来的地质认识革新,需要我们对已发现的古生界海相层系烃源岩生烃、成藏过程及演化规律进一步深化。重新认识古生界海相层系资源潜力及有效勘探区,成为制约油气勘探发展方向的关键问题。同时,下伏南华—震旦系或更老层系碳酸盐岩的勘探价值和资源潜力也值得进一步探索。

二是海相碳酸盐岩储层多样性与圈闭复杂性问题。目前在三大克拉通盆地已发现岩溶缝洞型、礁滩孔隙型、白云岩孔隙型和裂缝型等四类碳酸盐岩储层,但不同盆地和古构造单元的储层特征各异,需要揭示这些差异性的成因及其油

气成藏效应。近期勘探不断发现与断层相关的岩溶和热液储集体新类型,但如何准确定义碳酸盐岩圈闭要素一直是困扰勘探家的现实问题。尤其是与不整合、断层、岩溶、裂缝、热液等储层相关的圈闭边界如何确定?塔里木盆地奥陶系岩溶缝洞型圈闭顶底板条件如何确定?同时,广泛分布的致密碳酸盐岩储集有效性问题更值得关注。

三是油气成藏多期性与有效保存问题。在塔里木、四川、鄂尔多斯等叠合盆地,古生界海相碳酸盐岩经历了多期次构造调整改造,既有普光大气田与塔河油田的保存,也有麻江等大型古油藏的破坏。这种破坏与保存有些是与区域性构造运动有关,对盆地尺度油气成藏起控制作用,也有些是局部的,仅影响区带尺度的油气藏分布。因此,分析构造作用对油气藏破坏与保存的影响,明确起关键作用的构造期次,弄清油气藏分布的主控因素,将是认识油气分布规律和确定勘探方向的关键。

四是超深层油气勘探领域与理论指导问题。随着海相层系油气勘探不断取得新发现,碳酸盐岩油气藏新类型不断出现,传统的石油地质理念不断被突破。目前揭示的有效储层埋藏深度已经到了 8500 米,迫切需要回答油气勘探的下限深度是多少、保存条件是否有极限、纳米级碳酸盐岩孔隙能否成为有效储集空间等基础理论认识问题。前期形成了有效烃源岩控制油气分布、古环境—古隆起—古斜坡控制储层发育的认识。在深层勘探目标评价上,要突破传统地质评价思维,强调资源条件、工程技术条件、经济效益条件三要素有机结合的新要求。

五是海相深层页岩气储层有效性问题。前期形成了以生烃、储集和保存条件为核心的深层页岩气“三元富集”理论,分别建立了以涪陵和威荣页岩气田为典型代表的“构造型”和“连续型”页岩气富集模式。需要进一步明确深层页岩与浅层页岩在高温高压条件下岩石力学性质、有机孔保持机制、页岩气赋存方式和多相态流动机理的差异性,着力解决深层页岩气富集高产区优选评价标准缺失问题。因此,必须综合考虑含气性、可压性和经济性等要素,更加突出甜点区、甜点段、甜点层的评价优选,更加突出低成本配套技术和可动用资源的经济性。

关键技术瓶颈问题待突破

中国海相深层油气勘探开发虽然取得重要进展,但海相深层油气藏具有超高温、超高压、构造复杂、地震波场复杂、储量品位低、单井产能低等特点。因此,高效勘探和有效开发仍面临诸多挑战,需要进一步开展勘探—开发—工程一体化的多学科交叉融合攻关研究。

第一,建立深层勘探目标优选与风险评价决策系统。在塔里木、四川和鄂尔多斯盆地的长期勘探实践中,逐渐形成并建立了一系列适合研究区特定地质条件的油气成藏模式,不仅指导了勘探发现,而且丰富和发展了中国特色的海相深层油气勘探地质理论与目标评价技术。需要在这些工作的基础上,建立基于地质—工程—经济一体化、勘探—开发—工程一体化、储量探明与产能建设一体化的深层勘探目标优选与风险评价决策系统。

第二,完善储层地质建模与地球物理预测技术。油气勘探家们需要从复杂地表、地质条件下的高质量地震采集入手,实现复杂地表、地质结构的准确成像,结合沉积相带、储层研究,攻关碳酸盐岩和烃源岩有效储层预测以及油气藏识别技术,精细刻画多尺度储集体,解决油气藏精细描述与目标落实的关键问题,形成适合于沙漠区可控震源地震高效采集技术,完善基于可控震源复杂地区超深层三维地震设计、采集、处理、解释及综合应用技术体系。

第三,创新海相深层油气开发理论与技术。油气开发专家们需要直面开发出的层时代老、埋藏深、储集空间

类型多样、高温高压、多尺度复杂流体等特殊性,加强储集空间、岩石物理、流动规律和高效开发模式研究,形成勘探开发一体化、地质—工程—油藏三位一体化的多尺度储集空间刻画技术、深层热—流—固建模和数值模拟技术、开发工程优化技术、深层—超深层储层改造大幅度提高单井产能技术,创新深层页岩气低成本开发技术以及提高采收率技术。

第四,攻克超深井优快钻完井技术。海相深层钻井常常面临高陡构造、高温高压、地层破碎、喷漏共存等挑战,井身结构设计难度大。近年来,中国钻井工程技术水平逼近 9000 米。需要加强深层地质—工程—环境因素预测、钻完井及储层改造优化设计以及配套技术研究,重点攻克超深层定向井和水平井优快钻井技术、高温高压易漏易窜地层高效固井技术、高温高压条件下测井和测试技术、高温高压条件下碳酸盐岩储层酸化改造技术,以及深层页岩气长水平段水平井优快钻完井和压裂改造技术。

第五,开发信息化智能化与大数据新技术。开展油气勘探开发核心价值链分析,系统整合油气勘探、油藏评价、油气开发和油气生产等环节的大数据。从地震数据体的大数据分析与智能化储层预测、测井解释成果数据的大数据分析与智能化解释、油气勘探有利目标区优选的大数据分析研究与应用入手,建立基于大数据的智能勘探系统、基于大数据云计算的勘探开发专家库和智能云平台。

油气行业发展前景展望

国内外能源行业正向着清洁化、低碳化转型,但油气仍将是未来相当长时期内能源消费的主体。“十四五”是中国向高质量发展转型的攻坚期,经济增长新动能不断壮大,国内油气消费持续增长。预测在基准情景下,中国油气 2030 年需求量将分别达到 7 亿吨、5500 亿~6000 亿方。而当前,中国油气对外依存度分别超过了 70%和 40%,保障国家能源安全是国内油气勘探开发面临的重要任务。

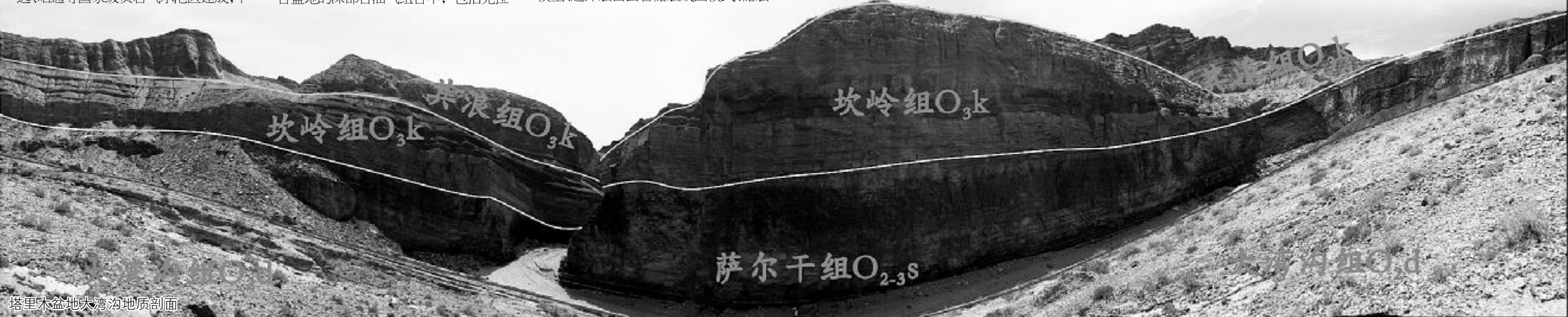
受新冠肺炎疫情的影响,全球经济增速减缓,国际油价保持中低位宽幅震荡概率较大。同时,中美贸易摩擦长期性复杂性进一步显现,一些关键技术与装备、软件存在“卡脖子”风险。值此百年未遇的大变局之际,过高的油气对外依存度会严重制约国家能源安全。需要我们长期的攻坚克难,突破我国自身油气供应瓶颈、扩大供应规模,才能减缓中国油气对外依存度过高的局面。

受地质条件、地质认识、工程技术、政策环境和体制机制等因素的制约,要将我国油气产量长期保持在 4 亿吨油当量的年产量水平,需要年均新增地质储量不低于 20 亿吨油当量,不是一件轻而易举的事情。这是我国油气行业上游板块“十四五”面临的主要矛盾和必须面对的战略选择。

油气勘探开发要实现可持续发展,正确的发展战略是关键,必须立足当前展望长远,兼顾发展与质量谋划未来。必须依靠科技推动,油气并重、常规非常规并举、海陆兼顾,立足重点盆地,加大勘探开发力度,践行“四个革命、一个合作”的能源安全新战略,切实肩负起确保国家能源安全的使命。

中国海相深层油气资源丰富,油气藏类型丰富多彩,是寻找大油气田、实现油气可持续发展的关键所在。海相深层油气藏地质、工程条件复杂,高效勘探和效益开发难度大,机遇与挑战并存。需要进一步加强多学科交叉融合的基础理论研究,深化跨公司和跨行业的共性工程技术协同攻关,推动深层油气勘探开发不断取得新的进展。同时,加强勘探开发一体化、地质工程一体化的管理和运行模式创新,不断提升勘探开发的效率和效益。

(作者系全国政协委员、中国工程院院士、中国石油化工集团有限公司总经理)



塔里木盆地大海沟地质剖面