

责任编辑:秦紫函
电 话:59964339
邮 箱:
qinzih@sinopec.com
审 校:张春燕
版式设计:王强



周“油”列国
油 事 精 彩

专家观点

谱写碳酸盐岩油气勘探壮阔史诗

□中国石化石油勘探开发研究院

张军涛 钟静彬

全球能源基石与东方崛起

碳酸盐岩作为地球多圈层系统中沉积的重要组成部分,承载着人类文明发展的能源命脉。在全球油气资源版图中,碳酸盐岩油气资源以其规模大、产量高的特点在能源体系中一直占据主导地位;从波斯湾沿岸绵延千里的侏罗系生物礁,到墨西哥湾盐下白垩系颗粒滩,这些地质奇观构成了现代工业的能源基石。

面对我国碳酸盐岩领域“埋藏深、构造期次多、成岩改造强、温压场复杂”的勘探实际,地质学家历经半个多世纪的砥砺前行,在塔里木、四川、鄂尔多斯三大盆地取得显著进展;发现了塔里木盆地奥陶系岩缝洞体经受加里东期隆升剥蚀与喜马拉雅期断裂活化双重改造;四川盆地二叠系生物礁经历深埋白云石化与燕山期流体叠加改造;鄂尔多斯盆地马家沟组白云岩则记录了华北克拉通多旋回岩溶作用等独具特色的油气地质现象。

地质复杂性促使我国碳酸盐岩油气勘探开发走出了一条“非均质性理论创新”的特色道路,我国深层超深层油气勘探开发技术已走在世界前列,深层超深层碳酸盐岩探明储量占比持续攀升,成为国家能源

安全的战略接替领域。

三次认知革命推动油气勘探革命

我国碳酸盐岩油气勘探史是一部突破认知边界、重构能源地理的壮阔史诗,其核心动力源自三次颠覆性认识革命。

一是从陆相到海相的范式转移。20世纪中叶,勘探人员在四川盆地威远构造的震旦系白云岩中获得工业气流,不仅拉开了我国古老层系勘探的序幕,更引发了对海相地层含油气性重新审视。但当时仍局限于陆相生油学说,海相碳酸盐岩被视为“贫瘠之地”。直至20世纪70年代,任丘油田在渤海湾盆地奥陶系古潜山中实现突破,“新生古储”模式揭示了新生代构造运动对古生界储层的活化效应,真正开启了海相勘探的新纪元。这一阶段的理论突破,本质上是将油气成藏研究从“源控论”拓展至“构造-储层耦合”的多元视角。

二是从均质到非均质的认知跃迁。传统碳酸盐岩勘探遵循“寻找构造高点、追踪均质块体”的思路,但该理论在塔里木盆地遭遇严峻挑战——沙参2井虽在奥陶系获高产油流,但后续钻探成功率低。转机出现在1997年塔河油田沙48井的突破,该井揭示了缝洞型储层彻底颠覆了“均质块状油藏”假说,首次系统论证了碳酸盐岩储层的离散式分布特征,建立了“古地貌控储、断裂疏导、多期成藏”动态

模型,不仅催生了高精度地震各向异性检测技术,更推动了勘探策略从“打高点”向“追缝洞”的转型。

三是从浅层到超深层的理论重构。随着勘探深度突破9000米大关,传统成藏理论面临新的挑战:超压环境下储层是否完全致密化?深部流体如何维持孔隙有效性?顺北油田的发现给出了颠覆性答案——走滑断裂带控制的缝洞储集体在超深层依然多见。“走滑断裂带控储”理论揭示了构造应力场与流体化学场的协同保孔机制,将有效储层预测深度边界向下拓展至3000米。与此同时,普光、元坝等高含硫气田的开发实践,构建了“地质风险量化评价-工程安全智能控制”全链条理论体系,我国成为复杂碳酸盐岩气藏开发的国际标杆。

中国石化四大发现:理论创新铸就实践丰碑

塔河油田的勘探史完整演绎了岩溶型油藏从偶然发现到系统开发的认知跃迁。早期勘探受限于缝洞体分布的强非均质性,直至“岩溶带控储”理论的提出,才揭示了表生期大气水溶蚀、埋藏期热液改造与构造期断裂活化的孔隙演化机制,发现我国首个古生界海相亿吨级大油田。基于此恢复了海西早期古地貌和古水系,建立了岩溶发育模式,指导形成了“地震波形结

构反演-动态产能模拟”一体化技术,缝洞体钻遇率实现跨越式提升。

普光气田的突破标志着我国在高含硫气藏领域实现了从理论跟随到标准制定的角色转变。针对硫化氢浓度超常、安全风险极高的挑战,创新提出深层碳酸盐岩“三元控储”理论,突破了传统理论的局限。在开发层面,“地质-工程-安全”三位一体理论框架系统解决了含硫流体封存机制、井筒完整性保障等世界级难题。

元坝气田的发现历程是一部破解海相生物礁强非均质性的理论创新史。面对台地边缘带迁移规律不清、储层“甜点”预测困难的挑战,建立了“早滩晚礁、多期叠置、成排成带”的发育模式,提出“孔缝耦合”的超深层生物礁优质储层发育机理新认识,创新建立“三微疏导、近源富集、持续保存”的超深层油气成藏模式。创新形成复杂山地超深层地震勘探技术系列,超深层储层预测厚度与实钻误差小于7%,孔隙度误差小于10%,探井钻遇储层成功率100%,探井成功率92%。

顺北地区超深层勘探的突破,彻底改变了碳酸盐岩成藏深度极限的理论认知。提出“走滑断裂带控储藏”理论,建立断裂带“簇簇状”结构模型,指导发现了多个超深层高产油气藏,先后解决超深、高温、高压等工程难题,探索形成具有顺北特色的复杂超深层井身结构设计、配套技术和标准规范,大

幅缩短超深井钻井作业周期,多口井多项工程指标刷新亚洲纪录,有力推动了顺北油田高质量勘探,为全球超深层勘探提供了新的理论范式和工程案例。

未来图景:创新引领深地探索

在“三元控储”理论基础上,多学科交叉融合催生新一代成储成藏理论体系。

传统与新兴技术推动理论体系拓展完善。古海洋化学与成储机理通过重建古海水pH值、氧化还原条件等参数,揭示微生物岩与鲕粒滩的差异成孔规律;构造-流体协同演化量化多期造运动与有机酸流体的时空耦合关系,预测深部次生孔隙发育带;数字孪生与智能预测构建盆地尺度的虚拟地质模型,实时模拟亿年尺度的岩溶-构造演化过程。

新兴理论正在重塑油气勘探思维。在塔里木寒武系盐下领域,微生物诱导白云石化理论指导发现了新的勘探靶区;在四川盆地灯影组,古流体地球化学追踪技术揭示了深部油气运聚路径。未来,理论深化将推动勘探对象向9000米以深、15亿年古老层系拓展,挑战成储成藏的理论极限。

我国独创的碳酸盐岩勘探理论正在产生全球影响力。中东鲁卜哈利盆地应用顺北断裂带理论发现了埋深超5000米的亿吨级油藏;哈萨克斯坦Aktobe项目借鉴元坝生物礁勘探经验将钻井成功率提升至行业领先水平。



西南油气田西霞凹坡
组宋兴2井测试现场。
万大晖 摄

知识链接

1. 碳酸盐岩的形成与分布

碳酸盐岩主要形成于温暖的浅海环境,由海洋生物(如珊瑚、有孔虫、藻类)的钙质遗骸及海水化学沉淀的碳酸盐矿物,经压实、胶结等成岩作用形成。主要岩石类型包括石灰岩和白云岩。其沉积环境集中于古陆表海、生物礁、开阔台地及台地边缘区域。

全球碳酸盐岩分布广泛,蕴藏世界60%以

上的常规油气储量。我国碳酸盐岩油气资源主要富集于四川盆地和塔里木盆地。四川盆地深层-超深层震旦系、寒武系、二叠系、三叠系碳酸盐岩蕴藏丰富的天然气资源。塔里木盆地塔北、塔中地区奥陶系碳酸盐岩则发育塔河、顺北等超深油田,勘探深度普遍超8000米。

2. 油气在碳酸盐岩中的聚集机理

油气生成始于富含有机质的烃源岩(如泥页岩),在缺氧还原环境和热力作用下形成烃类物质。生成的油气在压力差驱动下发生初次运移和二次运移,通过岩石孔隙、裂缝网

络或断层通道进行迁移。当运移中的油气遇到非渗透性盖层阻隔,或进入由孔隙、溶洞及裂缝系统构成的储集空间时,便聚集形成油气藏。

3. 国家能源碳酸盐岩油气重点实验室

国家能源碳酸盐岩油气重点实验室由中石化与中国石油联合共建,聚焦碳酸盐岩层系成烃成储机理与选区评价、储集体弹性波成像与智能预测、超深油藏与高含硫气藏高效开发、优快钻完井与储层改造、发展战略等研究方向,围绕勘探开发工程关键核心技术开展理论创新、技术突破、工程实践,推动成果及时转化与应用,致力于打造覆盖碳酸盐岩油气勘探开发全产业链。

实验室自主研发“深层超深层碳酸盐岩油气藏成藏定年技术”,构建了地质-地

球化学综合定年体系,有效解决了复杂成藏期次识别难题;“超深层碳酸盐岩油气藏储层预测、建模与数值模拟技术”“超深层碳酸盐岩优快钻完井与储层改造技术”为超深层储层评价、优质储层预测及一体化勘探评价提供关键技术支撑。在装备制造方面,实验室成功研制烃源岩动态定量评价仪、超深层储层模拟装置、高灵敏度质谱仪等核心实验装置。

实验室成立以来,3项成果整体达到国际领先水平,获得省部级科技奖励14项。(中国石油化工勘探开发研究院 武重阳 提供)

西北油田:新认识推动塔北“无人区”高效勘探开发

本报记者 王福全 通讯员 王旭辉

今年以来,西北油田于奇区块勘探开发频传捷报,阵地外扩持续取得新进展,在外围东、西、北三个方向部署的8口新井陆续投产,累计动用储量202万吨,单井日均产油20.5吨。这一成果为周边储量连片规模动用奠定了坚实基础。

于奇区块位于塔河油田北部复杂岩溶区,过去因为地质条件复杂,区域基础认识程度低、局部油气发现难以规模展开,在长达9年的时间里一直是勘探开发的“冷灶”区域。

转折发生在2022年,西北油田加大了塔北地区地质研究力度,进行了三维地震资料重新采集。在构建于奇西地区奥陶系海西期向斜汇流型框架、提炼出四种古地貌类型及相关储集体划分

标准等基础上,打破了长久以来“逢洞必充填”的禁锢,有力推动了塔北“无人区”高效勘探开发。2024年,于奇区块成功建成塔河油田外围首个30万吨/年产能阵地。

西北油田石油地质专家刘永立介绍,多项研究成果填补了近20年塔河北部古岩溶和成藏相关研究的空白,为发现于奇西奥陶系亿吨级油气资源规模提供了精准指导:科研团队首次提出于奇西地区实现亿吨级油藏商业发现和规模增储,提交探明石油储量3568万吨。

为提高勘探开发质量,实现规模效益开发。西北油田围绕塔北复杂岩溶区建立了以“地表水系精细刻画+多级相控迭代反演+未充填概率分析”三步法规模储集体预测技术和超稠油“一井多靶、分段酸压”储量高效动用技术。多种创新技术组合应用后,于奇区块规模储集体钻遇率从2023年的55.2%

特征和成藏地质过程等地质认识,将塔北相关区域划分为4个评价区,累计发现石油地质资源量1.5亿吨。目前,I区已建成快速增储上产区,II、III区形成滚动评价区。

在新构建的于奇西地区“原侧复合供烃,逆冲走滑疏导,构造反转腾储,带状优势保存”多期油藏富集模式指导下,于奇西地区实现亿吨级油藏商业发现和规模增储,提交探明石油储量3568万吨。

为提高勘探开发质量,实现规模效益开发。西北油田围绕塔北复杂岩溶区建立了以“地表水系精细刻画+多级相控迭代反演+未充填概率分析”三步法规模储集体预测技术和超稠油“一井多靶、分段酸压”储量高效动用技术。

多种创新技术组合应用后,于奇区块规模储集体钻遇率从2023年的55.2%



西北油田技术人员分析研究于奇区块上产措施。

杨建晖 摄

升至目前的91%,”一井多靶”成井率达到93.3%,均创历史新高,有效推动了该区域平衡油价明显下降。

近3年,新认识成果在塔北地区带动部署并投产新井56口,建产率达到90%,增油量74万吨,有效支撑塔河外围30万吨/年原油产能建设。

西南油气:在海相深处呈现“新气象”

本报记者 冯柳 通讯员 宋晓波

四川盆地海相碳酸盐岩油气总体具有“勘探领域多、气藏类型多、成藏过程复杂、埋藏较深、含硫化氢”等特点,而西南油气矿权区就像被打散的拼图:块小、分散,还常常卡在“深沟+陡坎”地形中,勘探难度极大。“十四五”以来,西南油气田立足全盆地深耕基础研究,创新认识、迭代工艺,将海相深处的“不可能”变为“新气象”。

老区焕新彩,再添千亿方探明储量

15年前,川西首口超深层海相探井科1井在雷口坡组获日产86.8万立方米气流,点亮川西海相第一束光。但随后的评价工作一度陷入停滞。

随着潮坪相白云岩成藏理论日臻完善和川西气田发现,科研人员重新梳理老资料,精细构造编图、储层预测、气水关系再厘定,终于破解控藏关键密码。新场构造冀部新深105井、新深106井分别测获日产105.64万立方米、73万立方米气流,一举圈定含气边界,在新场-马井地区新落实探明储量1015亿立方米,川西再添千亿立方米级规模储量。

以往川西雷口坡组油气发现集中于正向构造带,斜坡-凹陷区是否同样发育潮坪相白云岩气藏?科研人员围绕潮坪微相刻画、储层非均质性、地层尖灭识别与岩性圈闭评价展开系统攻关,构建斜坡带成藏理论与目标预测技术。今年在梓潼凹陷开部署的永兴2井、文星105井分别试获日产2.68万立方米、7.26万立方米天然气,证实了斜坡区也发育潮坪相白云岩气藏,实现雷口坡组由正向带到斜坡区的战略外扩。

创新破壁垒,泥灰岩里蕴藏气藏

在四川盆地海相雷口坡组成藏系中,潮坪白云岩与漏湖泥灰岩是对同源异相的“姊妹”。过去,一个被视为“甜点”储层,一个被认定为生油气的源岩和气藏保存的盖层。科研团队发现雷三段30~50米稳定泥灰岩内部微孔系统极其发育,具备储气能力,是致密碳酸盐岩新类型储层。

借鉴页岩气的储层表征方法和评价思路,他们在川南宜宾地区系统研究和评价,建立“岩相-孔隙-含气性”一体化评价模板,提出“源储一体、连续成藏”新模式。荣1井试获日产4.26万立方米气流,新增预测地质储量278亿立方米,证实泥灰岩既可生烃又能“自储自产”,发现宜宾地区新层系。

剑指万米处,深地夺气开启新征程

超深层一直是攻关研究的重点领域。针对7000米以下的栖霞组、茅口组,西南油气深化沉积储层研究,明确了有利储集相带展布,确立准同生期“滩体+岩溶+白云岩化”三位一体成藏新认识,构建“下生上储、断缝疏导、岩性控藏、优储控富”成藏富集模式,在川西、川南锁定多个圈闭,新桥1井等探井相继出现活跃的气测显示,有望实现勘探领域新突破。

科研团队针对万米深处川西震旦系灯影组,通过持续攻关,形成“旁生侧储、近侵蚀崖缘成藏”新认识,初步预测川西地区圈闭面积及资源量。当前,万米深井的可行性论证正在紧锣密鼓推进,有望拓展四川盆地西南探区资源接替的新深度。

中原油田:形成超深层海相碳酸盐岩勘探方法论

□杨敏 陶利萍

普光气田是我国首个超深层海相碳酸盐岩高含硫气田,曾以年产气91.24亿立方米的成绩撑起中原油田油气产量的“半壁江山”。然而,气田递减的现实让资源接续成为关乎发展的必答题。

中原油田勘探团队以啃硬骨头的韧劲直面挑战。他们手握新三维地震资料这把“钥匙”,遵循“区域地质规律,因地制宜,分区地质模型解剖”思路,深耕礁滩相储层预测技术。通过细化工带体类型,团队首次揭示长兴组生物礁“多期、多排、多类型”发育规律,建立飞仙关组“隆起延伸型、岩隆披覆型”礁体沉积模式,为勘探部署装上“精准导航”。

循着科学指引,勘探“利剑”直指新区带:分3井在长兴组测试获日产83万立方米高产气流,实现普光主体外围

重大突破;大湾4井在长兴组后滩钻遇良好显示,上报控制储量130亿立方米;2021年,老君4井以日产141万立方米的高产气量验证储层模式,推动分水岭、大湾、老君三个产能建设区落地……一系列突破,为普光气田稳产筑牢资源根基。

如果说礁滩相勘探是“守正”,岩溶气藏探索则是“出奇”。科研人员将目光投向茅口组、雷口坡组等未被充分认识的层系,在野外调查与钻探实践中,揭开了岩溶气藏的神秘面纱。

在普光探区,他们创造性提出“滩+不整合岩溶”控储规律,建立“浅滩+岩溶+裂缝”三元耦合模式,发现水平潜流带储层连片的重要特征。物探技术随后精准发力:波形聚类划分有利相带,蚂蚁穴不连续性追踪技术精细刻画缝洞系统。杨柳1井由此诞生,获日产天然气16万立方米,



中原油田勘探人员正在观察岩芯。

彭国桃 摄
支撑,更丰富了我国超深层油气成藏理论,为同类地区勘探提供“中原方案”。