

中国大陆地球内部物理学 与动力学研究 (下)

庆贺滕吉文院士
从事地球物理学研究
60 周年

陈运泰 金振民 石耀霖
杨文采 朱日祥

/ 主编

滕吉文



科学出版社

中国大陆地球内部物理学 与动力学研究

——庆贺滕吉文院士

从事地球物理学研究 60 周年

(下)

陈运泰 金振民 石耀霖 主编
杨文采 朱日祥

科学出版社

北 京

第五篇

金属矿产资源与油、气、煤能源

世界上任何国家的盛兴，都必然地要依赖于金属矿产资源和能源的消耗。可以这样说，若没有过去大量资源和能源的消耗，也就不会有今天的世界文明。

我国现正处在快速工业化和经济腾飞的前夜，矿产资源与油、气能源的紧缺已造成对外的依存度不断增大，战略资源和能源的受控格局已为必然。为此在当今多元化共享世界资源与能源的同时，必须立足于本土，且通过构建资源与能源的战略后备基地，为人民营造一个良好的生活与生存空间已迫在眉睫。为此强化第二深度空间的金属矿产资源（500—2000m 深度范围内）和能源（5000—10000m 深度范围内）的探查，以达在深部发现大型、超大型矿床（田）必须提上日程。这一论点与论据自 2006 年提出后，近年来已取得了重要突破。

本篇由 26 篇文章组成，在方法上，涉及地震勘探（包括井中探查和微震）、电法探测、重力勘探、磁法勘探、航空物探和综合物探等；在矿产种类上包括石油、天然气、煤炭和金属矿床，并对煤矿井下灾害事件进行了研究与探查。因为这是关系到资源和能源的探查、利用和可持续发展的重大科学问题。

中国陆上深层海相碳酸盐岩地震勘探技术需求与发展

赵文智 张研 胡素云

(中国石油勘探开发研究院)

摘 要 理论技术进步是油气勘探获得突破发现的基础与条件。“十一五”以来,中国石油以地质认识为指导,以勘探技术为手段,加强塔里木、四川、鄂尔多斯等盆地深层海相碳酸盐岩油气勘探,获得了一系列重大突破与发现,形成了新的规模储量区,深层古老碳酸盐岩已经成为油气勘探增储的重要接替领域。同时,针对深层碳酸盐岩埋藏深、储层非均质性强等特点,加强技术攻关,地震勘探技术有了突破性发展。目前中国石油已经形成了针对不同地表条件、不同碳酸盐岩储层及油气藏类型的地震勘探配套技术,为深层碳酸盐岩增储上产提供了可靠的技术保障。地质研究表明,我国深层碳酸盐岩具有良好的油气勘探前景,随着勘探深度的不断拓展,现有地震勘探技术在解决超深层碳酸盐岩领域、区带和目标评价上尚有进一步提升与发展的空间,需要在科学把握技术指标与经济指标关系的前提下,发展旨在提高深层地震资料信噪比、分辨率的保真处理技术和储层预测技术,为深-超深层碳酸盐岩油气勘探提供有效的技术保障。

关键词 深层碳酸盐岩, 地震技术, 技术需求, 技术发展, 经济性、时效性、适用性

0 引 言

近年来,随着地质认识的不断深化与勘探技术进步,我国深层海相碳酸盐岩油气勘探获得了一系列重大突破,塔里木盆地立足塔北、塔中两大古隆起加大勘探力度,塔北隆起南缘斜坡哈拉哈塘地区发现了奥陶系鹰山组岩溶缝洞型大油田;塔中断裂带北斜坡勘探,奥陶系良里塔格组礁滩、鹰山组岩溶等多目的层获得重大突破,形成塔北、塔中两大海相碳酸盐岩油气富集区。四川盆地围绕开江-梁平海槽台缘带礁滩体勘探,发现了铁山坡、罗家寨、滚子坪、普光、龙岗等一批大气田;加强川中古隆起古生界碳酸盐岩勘探,获得了战略性突破,形成大型含气区。鄂尔多斯盆地立足碳酸盐岩风化壳岩溶储层,在靖边气田西部岩溶带获得新的突破,发现奥陶系马 4-10 新的含气层系。从近期的碳酸盐岩油气勘探发现看,含油气层系埋深普遍大于 4000m,塔里木盆地甚至超过 7000m,显示出深-超深层海相碳酸盐岩良好的油气勘探前景。上述油气勘探成果的取得离不开地震技术进步,中国石油初步形成了复杂地表三维地震采集、

叠前时间/深度偏移成像处理和不同类型碳酸盐岩储层预测和流体检测技术,为油气勘探开发奠定了扎实的技术基础。

1 中国陆上深层海相碳酸盐岩油气地质特点

1.1 关于深层定义

关于深层定义,国际上没有严格标准,不同国家、不同机构对深层的定义并不相同。目前国际上大致将埋深大于 15000 英尺(4500m)的油气藏定义为深层油气藏,其中俄罗斯将埋深大于 4000m 定义为深层,美国和巴西将埋深大于 15000 英尺(约合 4572m)定义为深层、道达尔公司将埋深大于 5000m 定义为深层。

中国 2005 年全国矿产储量委员会颁发的《石油天然气储量计算规范》,将埋深 3500~4500m 定义为深层,大于 4500m 定义为超深层。中国钻井工程采用 4500~6000m 为深层、大于 6000m 为超深层这一标准。中国前期油气勘探,基于东、西部地区地温场的变化,东部地区一般将大于 3500~4500m 定义为深层,大于 4500m 为超深层;西部地区 4500~5500m 定义为深层,大于 5500m 定义为超深层。即使按照传统的西部地区深层定义,我国近年海相碳酸盐岩油气勘探发现都属于深层范畴。

1.2 中国海相碳酸盐岩油气地质特征

总体看,中国发育的海相碳酸盐岩具有“克拉通块体偏小、地层偏老、原型盆地保存偏差,海相层系烃源岩丰度偏低、热演化程度偏高,碳酸盐岩储层埋藏偏深、非均质性强以及油气多期成藏、多期调整”等特点,海相层系油气的生成、运移、聚集成藏与调整改造过程相当复杂,但中国发育的古老海相碳酸盐岩层系具备形成大油气田的基础与条件。

1.2.1 发育常规烃源岩和源岩滞留液态烃裂解气两类源灶,都可以规模供烃

中国深层海相层系尽管埋藏偏深,热演化程度偏高,但发育两种类型烃源灶。一是常规海相烃源灶形成的烃源灶,具有早期生油为主,晚期生气为主的特点,经历了完整的“生油”和“生气”两个高峰,烃源岩生烃历史长,演化充分,生成的资源总量大。常规烃源灶主要由泥质岩和煤系两类烃源岩构成,近期研究表明我国塔里木、四川、鄂尔多斯等盆地深层海相层系发育的多套以泥质岩为主的优质烃源岩,不仅分布面积广、厚度大,而且有机碳含量较高,与煤系共同构成了常规烃源灶的主体,可为深层碳酸盐岩油气规模成藏提供充足的烃源。二是源岩中滞留分散液态烃高-过成熟阶段规模生气形成的气源灶。多组生烃动力学模拟实验,证实干酪根大量降解成气发生在 $R_o < 1.6\%$ 的成熟-高成熟早期阶段,液态烃裂解成气发生在 $R_o > 1.6\%$ 的高-过成熟阶段,液态烃生气时机晚于干酪根,但生气数量是干酪根的 2~4 倍,两者在生气时机和贡献上构成接力过程,这一认识大大提升了深层碳酸盐岩的勘探潜力,特别是天然气勘探潜力。近期塔里木盆地古城地区基于源岩滞留液态烃规模生气认识部署的古

城 6 井, 在奥陶系碳酸盐岩 6144~6169m 井段, 未采取任何措施获日产 $26.4 \times 10^4 \text{m}^3$ 的高产气流, 证实分散液态烃裂解成气可为深层碳酸盐岩规模成藏做出贡献。

1.2.2 两类岩溶和两类白云石化作用, 深层碳酸盐岩发育规模有效储层

研究发现, 两类岩溶和两类白云石化作用是促使深层碳酸盐岩发育规模储层的关键。我国深层发育的碳酸盐岩储层主要有岩溶型碳酸盐岩和白云岩两种储层类型, 其中层间岩溶和顺层岩溶是古老碳酸盐岩岩溶储层形成的主要机制。层间岩溶是碳酸盐岩地层短期抬升暴露的产物, 通常情况下沿不整合面或断层可以发生大面积的表生岩溶作用, 形成大量孔洞缝等, 使得碳酸盐岩储层物性得以改善。如塔里木盆地奥陶系发育的蓬莱坝组顶、鹰山组顶、一间房组顶和良里塔格组顶 4 幕层间岩溶作用的综合叠加, 有效勘探面积超过 $6 \times 10^4 \text{km}^2$ 。顺层岩溶多在碳酸盐岩古隆起的围斜部位发育, 是地表水沿早期层间岩溶面或表生期岩溶面向地层下倾方向发生侧向顺层渗流和溶蚀, 岩溶深度和范围相当大。如塔里木盆地塔北隆起围斜部位的岩溶深度可达几百至数千米, 有效储层分布面积约 1 万 km^2 。

深埋环境下, 受高温、高压和大跨度埋藏时间的联合作用, 成岩流体可以充分改造原岩, 形成优质白云岩储集层, 包括埋藏白云岩和热液白云岩储集层两类。埋藏白云石化作用发生在埋藏阶段, 以粗粒结晶白云岩为特征, 通常孔隙相对发育, 宏观上呈层状大面积分布。如塔里木盆地蓬莱坝组白云岩, 储集层分布面积可达 $3 \sim 5 \times 10^4 \text{km}^2$ 。热液白云岩是指富镁热液在温度和压力条件下, 沿着拉张断层或走滑断层或断裂系统向上运移, 遇到渗透性差的隔挡层侧向侵入到渗透性好的围岩中, 从而发生白云石化作用。目前较为典型的规模分布的热液白云岩储集层仅在塔里木盆地见到, 塔中鹰山组热液白云岩储集层以粗晶白云岩为主, 塔中中古 9 井热液白云岩储层单层有效厚度最大可达 16m, 孔隙度最大达 16.1%, 最大渗透率达 $637 \times 10^3 \mu \text{m}^2$ 。热液流体一般以断裂、不整合面和渗透性较好的岩石为通道, 所以热液白云岩储集层多分布在断裂带附近 (图 1)。

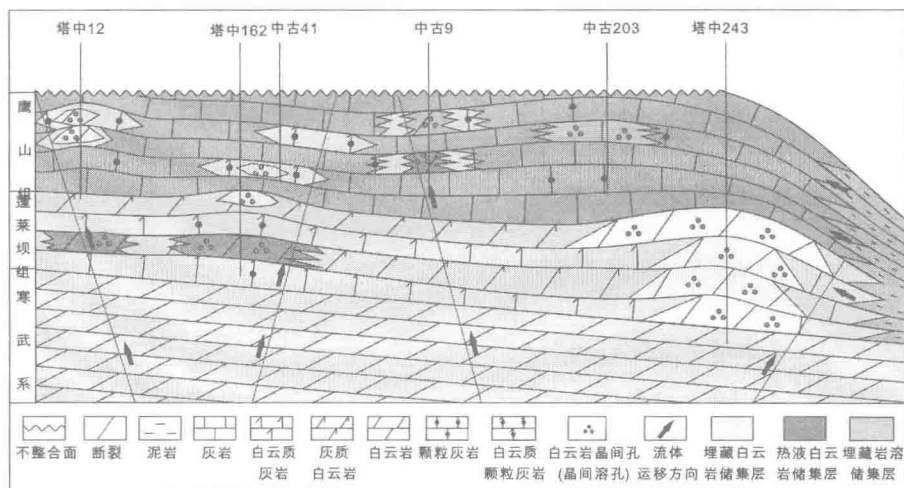


图 1 塔里木盆地埋藏白云石化和热液白云石化作用模式图

1.2.3 递进埋藏和退火受热相耦合，深层碳酸盐岩可以跨构造期成藏

近期研究表明，我国中西部发育的含油气盆地普遍经历了早期的高低温、后期的低地温（中生代以来逐渐降温）热演化历史，海相烃源岩受热基本处于退火过程。“递进埋藏”与“退火受热”的耦合作用，部分古老烃源岩近纪以来仍有大量液态烃的生成并成藏。以塔里木盆地寒武系海相烃源岩生烃演化为例，近期研究发现盆地寒武-奥陶系存在三种类型埋藏演化模式：①以满西 1 井为代表的持续递进埋藏型；②以塔东 2 井为代表的早深埋、晚抬升型；③以轮古 38 井为代表的早期持续浅埋、晚期快速深埋型。盆地热演化经历了中新生代以来的逐渐降温过程，递进埋藏与退火受热相耦合，部分烃源岩液态窗保持时间可达 4 亿年之久，这部分烃源岩生成的油气可以规避多期构造运动的破坏，近纪以来仍有大量的液态烃生成与成藏（图 2）。

近期以古老烃源岩跨重大构造期晚期生烃和成藏认识为指导，对塔里木盆地碳酸盐岩层系石油资源潜力进行了重新评价。一是基于古老烃源岩跨构造期成藏认识，确定长期处于“液态窗”范围内的烃源岩面积可达 $15 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占海相烃源岩面积的 58%，石油地质资源量增加一倍。二是基于源岩滞留液态烃晚期规模成气认识，评价海相碳酸盐岩天然气资源量，天然气资源量增加三倍。评价结果表明，我国发育的古老海相碳酸盐岩富油更富气。

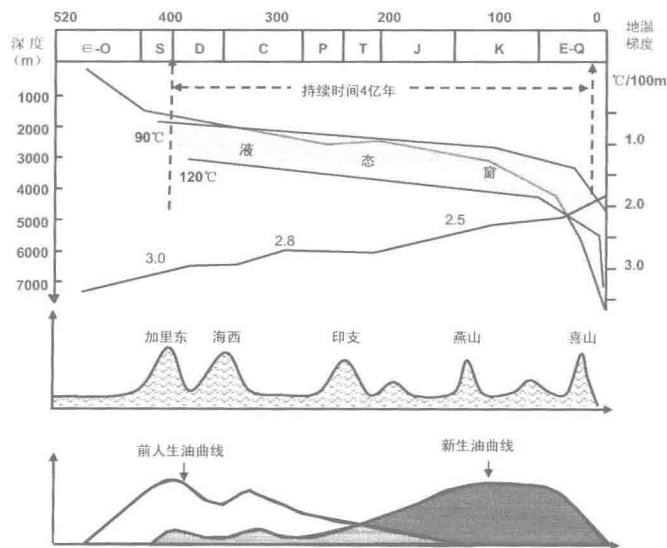


图 2 塔里木盆地海相碳酸盐岩层系跨重大构造期油气成藏事件分析图

1.2.4 深层碳酸盐岩可以大面积成藏，储量丰度不高，但规模很大

近期研究认为，中国发育的古老海相碳酸盐岩，受古老海相烃源岩晚期规模生烃与规模运移，顺层、层间岩溶和热液溶蚀、白云石化作用多期次叠加改造，古隆起周斜区及台缘带广泛发育地层、岩性圈闭群，断裂与不整合构成的油气空间运移网络四要素的综合影响，至少发育三种类型大面积成藏模式：一是隆起斜坡区岩溶储层似层

状大面积成藏模式,受隆起斜坡带区似层状岩溶储层控制,油气成藏经历了“浮力蓄能、裂缝疏导、洞-缝搭配控相、幕式充注、阶梯式运聚”过程,形成的油气藏以地层型油气藏为主,具有似层状大面积分布的特点;二是潜山风化壳岩溶储层倒灌式大面积成藏模式,受潜山风化壳岩溶储层控制,上覆烃源岩形成的油气在源-储压力差作用下向下运移,形成的油气藏以地层型油气藏为主,具有沿侵蚀基准面呈薄层状大面积分布的特点;三是礁滩储层大范围成藏模式,烃源岩形成的油气断层与不整合为运移通道,侧向运移、垂向运移并存,形成的油气藏以岩性油气藏为主,呈带状大范围分布。

统计中国碳酸盐岩已发现的 128 个油藏和 123 个气藏,岩性、地层油气藏占 83.6%;已发现的油藏储量丰度一般 $10 \sim 70 \times 10^4 \text{ t/km}^2$,气藏储量丰度多分布在 $1 \sim 6 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,以中低丰度为主。但从油气藏解剖研究看,中国古老碳酸盐岩发育的油气藏具有集群式分布的特点,具有单一油气藏规模不大,但由众多油气藏组成的油气藏群油气分布范围很广,储量规模相当大。如塔里木盆地塔北地区深层奥陶系岩溶储层勘探,油气分布受缝洞单元控制,中石化发现的塔河油田在 2800 km^2 含油范围内,可以划分出 100 个缝洞单元,平均每个缝洞单元的面积约 28 km^2 ,单一缝洞单元平均储量规模小于 $1000 \times 10^4 \text{ t}$ 。中石油发现的轮古油田,含油面积约 617 km^2 ,可以划分出 104 个缝洞单元,单一缝洞单元平均面积 5.9 km^2 ,单个单元平均探明储量 $145 \times 10^4 \text{ t}$ 。目前塔北地区勘探,已控制含油气面积近 $1.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,塔河油田探明油气地质储量 $11.7 \times 10^8 \text{ t}$ 油当量,哈拉哈塘地区形成了 $5 \times 10^8 \text{ t}$ 以上规模储量区。

2 深层碳酸盐岩油气勘探前景

中国海相碳酸盐岩地层分布面积逾 $450 \times 10^4 \text{ km}^2$,根据全国新一轮油气资源评价成果,我国海相碳酸盐岩有油气资源量 $380 \times 10^8 \text{ t}$ 油当量。前期中国的海相碳酸盐岩勘探主要集中在三大盆地的重点区块,真正投入勘探的面积约 $20 \sim 50 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占碳酸盐岩分布面积的 34%。截止“十一五”末,中国海相碳酸盐岩领域,累计探明石油地质储量 $15.2 \times 10^8 \text{ t}$ 、天然气地质储量 $1.36 \times 10^8 \text{ m}^3$,油气资源探明率仅为 15%,剩余油气资源十分丰富。

中国深层古老碳酸盐岩油气资源潜力还有进一步提升的空间。首先,中国发育的古老海相碳酸盐岩,具有常规烃源岩和源岩滞留液态烃晚期裂解成气两类烃源灶,都可以规模供烃。前期的油气资源评价,主要考虑的是常规烃源灶对成藏的贡献,而对滞留于源岩内分散液态烃晚期裂解成气形成的气源灶对成藏贡献没有考虑。实际上,源岩内滞留烃裂解形成的气源灶具有生气时机偏晚的特点,极大地规避了晚期构造运动对成藏破坏的影响,成藏效率和保存几率更好,可以大大提升我国深层碳酸盐岩层系发现天然气的潜力和前景。近期,基于有机质“接力成气”认识(赵文智,2003年),对塔里木盆地高-过成熟区资源潜力进行了评价研究,结果显示塔里木盆地滞留源岩内液态烃晚期裂解成气对盆地海相层系的油气资源贡献率达 50%以上,天然气资源总量可达 $2.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。评价全国海相高-过成熟区资源潜力,烃源岩分布面积 $230 \times 10^4 \text{ km}^2$,净增天然气地质资源量 $5 \sim 8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

3 中国海相碳酸盐岩地震技术发展现状

我国海相碳酸盐岩沉积普遍具有埋藏深、多旋回构造运动改造强、储层非均质性等特点,地震勘探面临着地表条件复杂、原始资料信噪比低、目的层段资料品质难以满足构造精细解释、储层预测需求的技术挑战。“十一五”以来,围绕重点探区碳酸盐岩油气勘探技术需求,开展了多轮针对性技术攻关,初步形成了针对不同地表条件、不同碳酸盐岩储层类型的地震勘探配套技术。

实现三大盆地碳酸盐岩区带评价、目标优选、储量落实和产能建设目标,关键是要突破碳酸盐岩非均质储集体预测问题。高品质的原始地震资料采集是碳酸盐岩勘探的前提,高精度的地震成像是碳酸盐岩储层预测的基础,有效的储层预测和流体识别技术是实现碳酸盐岩高效勘探开发的关键。由于油气藏形成与分布的多样性,不同盆地地震—地质条件存在差异,地震勘探技术的适用条件和发展程度各不相同。

3.1 塔里木盆地海相碳酸盐岩地震勘探技术发展现状

塔里木盆地碳酸盐岩油气勘探的主要对象包括:礁滩相、岩溶型和白云岩储层。经过多年的实践,在塔里木盆地已初步形成了潜水面下激发、小面元、高覆盖的三维地震采集技术,显著提高了深层地震资料的信噪比;实现了叠前时间偏移工业化应用,大幅度提高了岩溶储层的成像精度;推广以古地貌恢复为基础的岩溶储层研究方法,形成了以“串珠状”强反射解释为核心的缝洞储层识别技术,提高了缝洞体钻遇率。针对白云岩油气藏勘探,借鉴潜山地震勘探的技术思路,形成了以落实白云岩潜山形态为主的地震解释技术。

塔北哈拉哈塘地区碳酸盐岩岩溶油气藏勘探实践是一个典型的地质认识深化与地震技术进步相互促进发展的案例。哈拉哈塘地区地表条件以农田为主,相对于塔中地区而言较为有利,奥陶系目的层埋深在 6000m 以下。塔北隆起斜坡区具有突破性意义的勘探始于 2005 年。当时利用哈拉哈塘区内 2004 年新采集测线的 25 条二维地震资料,结合老二维地震资料,以及邻区乡 3 井及周边已钻探井分析,于 2006 年年初,提出了奥陶系鹰山组内部的强反射极有可能是岩溶储层的反射特征的新认识。从区域构造演化及储层分析研究来看,斜坡部位也具备发育岩溶储层的地质条件(图 3),极大增强了勘探的信心和决心。塔北隆起高部位岩溶储层已发现十亿吨级大油田,如突破斜坡区,将为塔里木准备开辟新的勘探战略接替领域。在此认识指导下,于 2006 年 2 月于轮南低凸起西部斜坡带哈拉哈塘地区部署哈 6 井,探索塔北隆起围斜部位哈拉哈塘地区奥陶系储层含油气性。

哈 6 井于 2006 年 4 月开钻,2007 年 1 月钻至奥陶系下统鹰山组鹰四段完钻。奥陶系录井共发现较好的气测显示 16.0m/6 层。2007 年 3 对奥陶系一间房组进行酸压改造,地层不吸液,试油结论干层。哈 6 风险探井钻探后,通过对塔北地区奥陶系碳酸盐岩顶面重新解释成图和石油地质条件的重新评价,认为哈拉哈塘是轮南低凸起奥陶

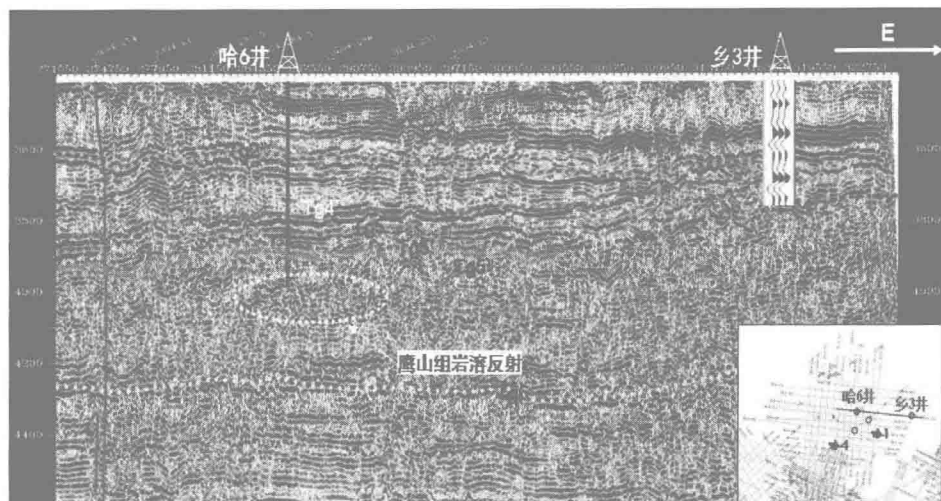
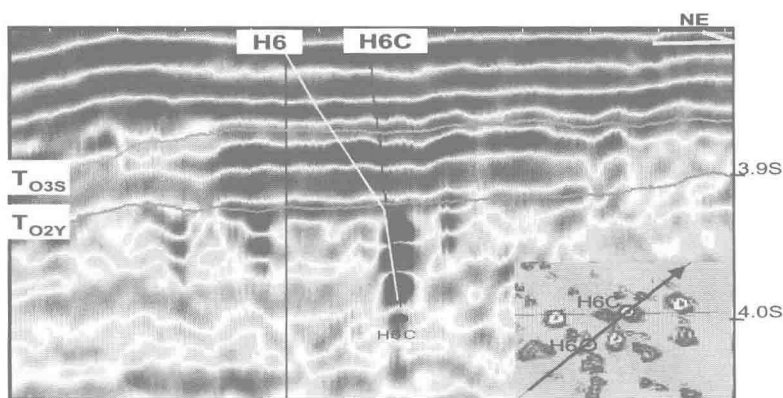


图3 过哈6井-乡3井东西向二维地震剖面

系潜山背斜的西斜坡，中、下奥陶统为统一的碳酸盐岩台地沉积，为碳酸盐岩储层发育奠定物质基础；奥陶系发育多期不整合，岩溶储层大面积发育，具备规模油气聚集条件；该区紧邻塔河大油田，哈6井奥陶系钻遇良好油气显示，石炭系获工业油流，证实斜坡区存在油气运聚过程，成藏条件优越。依据哈6井的钻探认识，准确预测有效缝洞型储层是该区能否突破的关键。据此，2007年底在哈6区块部署三维地震采集506km²。新的三维地震资料表明，哈6井钻探偏离了有效缝洞储层发育区（图4），利用高精度三维地震资料对哈6井进行了侧钻靶点设计H6C井，获得日产882方的高产工业油流，同时利用新三维资料部署并完钻的哈7、8、9三口井都顺利钻遇优质储层，并获得油气。



黄线为新井轨迹，右下图为溶洞及测线平面位置

图4 过哈6井侧钻轨迹及三维地震剖面

在哈6区勘探开发中，发现部分井奥陶系碳酸盐岩储层高产，但油水关系复杂。对应的地震资料处理解释中的主要问题包括：主要二叠系火成岩厚度、速度变化剧烈，

潜山顶面成像及缝洞体准确归位难；缝洞体规模难以合理量化；缝洞体流体难以有效预测。为提高碳酸盐岩缝洞成像精度及缝洞体定量描述精度，2009~2010年在哈拉哈塘开展物探技术攻关，通过叠前处理、储层预测、流体识别、缝洞雕刻，为哈6井区勘探开发单元划分与高效井位优选提供依据。

经过两年的地震技术攻关，形成了2项关键技术。首先是应用叠前深度偏移技术解决上覆二叠系火成岩屏蔽影响，提高成像精度。深度偏移资料的串珠呈现出“整体南偏”的特点，与区域速度变化规律（东南低，西北高）一致，深度偏移成像更加准确。其次是形成了缝洞单元量化雕刻技术，采用应用多信息融合的三维可视化分析和雕刻技术开展缝洞系统连通性分析与单元划分，通过模型正演求取校正系数、地震反演求取孔隙度数据体、分级雕刻计算总体积的“三步法”实现量化描述，利用波阻抗体向深度域孔隙度体转换，实现定量计算，根据孔隙度值的不同，分级进行雕刻，分别计算体积并求和，得到总体积（图5）。



图5 缝洞单元定量描述技术效果图

为进一步提高资料成像精度、量化缝洞体雕刻技术、探索叠前裂缝预测技术，为哈6井区储量探明提供条件，2010年部署哈601三维100km²，观测方向与哈6三维正交，形成拟全方位数据。同时部署哈7高密度三维83km²，并开展处理解释技术攻关。对比哈6常规三维-哈601拟全三维-哈7高密度三维，可以发现资料品质逐级提高（图6）。

处理解释技术方面取得了多项进展，成像方面各向异性PSDM速度建模技术比以往更精细、全三维融合处理技术有创新、逆时偏移技术攻关取得初步应用实效，叠前裂缝预测精度显著提高，建立起利用裂缝密度判识有效裂缝标准，缝洞体量化雕刻技术往前迈出了重要一步，建立了基于缝洞相、片状反射、杂乱相的几何结构模型，充分展示了缝洞体的空间形态、分布特征、体积大小、相对高低，为高效井位的部署、措施制定、储量计算打下了基础。

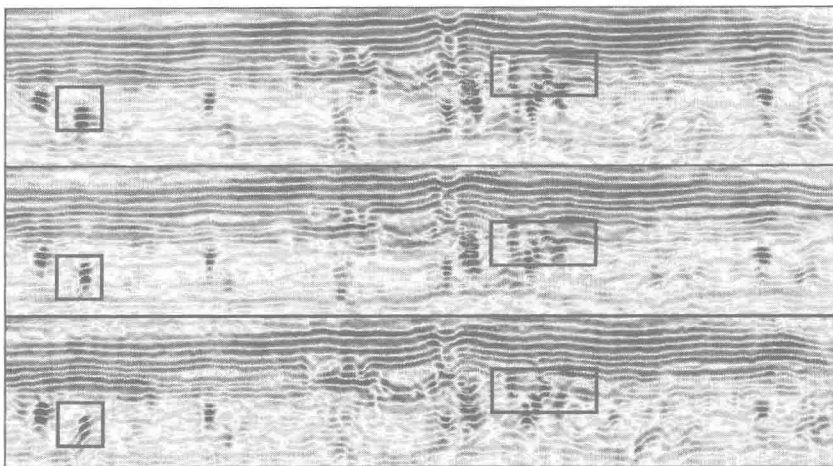


图6 哈6常规三维(下)、哈601拟全三维(中)、哈7全三维(上)资料品质逐级提高

在哈6区块勘探开发稳步推进的同时,进一步加大了其他新区三维地震及预探部署力度,并将攻关形成的有效技术推广应用。2009年初在哈6区块西侧新垦区块采集三维地震455km²,2010年初在哈6区块南侧热瓦普区块采集三维地震669km²、哈6区块北面的齐满区块采集三维地震288km²,2012年初在新垦区块西面的其格区块采集三维地震567km²、热瓦普区块南面的金跃区块采集三维地震540km²。哈拉哈塘地区六连片三维地震总面积达到3025km²。

塔北哈拉哈塘地区岩溶油气藏勘探历程经历了二维找领域、常规三维定目标、宽方位(全方位)三维深化认识、区域三维拓展规模四个阶段证明了地震技术与地质认识两者之间相辅相成的发展关系,为今后发展面向深层碳酸盐岩领域的地震技术发展方向与思路选择积累了经验。

3.2 四川盆地海相碳酸盐岩地震勘探技术发展现状

四川盆地碳酸盐岩油气勘探的主要对象包括:石炭系白云岩、二叠系长兴组生物礁、下三叠统飞仙关组鲕滩。油气勘探经历了几十年的探索实践。在早期阶段,根据地表露头资料和地球物理资料判断出地下构造的位置,开展构造气藏的勘探工作;在上个世纪80-90年代,应用地震“亮点”技术发现了一批气藏,逐步实现从构造向岩性过渡的探索;近年来川中古隆起安岳气田的发现掀起了碳酸盐岩勘探的热潮,有效促进了四川探区碳酸盐岩地震勘探技术的发展。在2011年高石1井突破阶段,川中地区仅有少量的三维资料,且主要针对三叠系须家河砂岩储层,目的层层埋深相对较浅(3000-3500m),地震资料覆盖次数较低,目的层段地震资料频带宽度在10-30Hz,主频为25Hz,资料品质难以满足深层(4500m以下)碳酸盐岩构造精细解释和储层预测精度要求。近年来,大力发展面向中深层的三维采集技术和处理解释攻关,到2013年年底,在龙岗地区累计实施三维地震3400km²,在高石梯-磨溪地区累计实施三维地震3142km²,寒武系-震旦系地震资料频带宽度达到8-40Hz,主频达到了35Hz。目前,

已形成了针对深层白云岩气藏的宽方位、全数字高密度地震采集、保幅高分辨率处理、基于层序地层学的地震解释、地震岩石物理测试分析、白云岩储层及流体预测以及井位综合评价等三维地震勘探配套技术,有力支撑了大川中深层白云岩天然气勘探。

3.3 鄂尔多斯盆地海相碳酸盐岩地震勘探技术发展现状

鄂尔多斯盆地下古生界碳酸盐岩为海相沉积,储层以白云岩风化、高能带的亮晶颗粒灰岩、碳酸盐岩次生溶蚀孔隙、致密碳酸盐岩裂缝为主,物性差异大,非均质性强。该探区地表沟壑纵横,梁峁交错,交通不便,干旱少雨,自然环境十分恶劣,造成鄂尔多斯盆地地震勘探难度大,野外施工困难、资料品质差、地震分辨率低。为开辟鄂尔多斯盆地西北部下古生界天然气勘探新区带,2008 年进行物探技术攻关,开展奥陶系内幕地震成像处理和碳酸盐岩储层描述技术研究,建立了以叠前深度偏移为核心的高精度成像处理技术系列,改善了奥陶系内幕成像的质量,形成了缝洞储层地震识别技术系列,探索了缝洞储层含气性检测关键技术。根据地震资料部署的余探 1 井在克里摩里组获得工业气流,这是自从 1985 年来下古生界碳酸盐岩风险勘探时隔 25 年来的又一重大突破。2012 年首次在鄂尔多斯盆地开展了 600km² 大面积黄土塬三维地震攻关(苏 203 井区),精细刻画了碳酸盐岩沟槽和台地,预测了白云岩裂缝发育区,区内 31 口已完钻井的验证符合率达 80% 以上。

“十一五”以来,中国陆上海相碳酸盐岩油气勘探不断取得突破性进展,地震技术发展迅速。回顾三大盆地碳酸盐岩地震技术发展历程,可以发现三个特点,首先是需求驱动,勘探领域延伸,勘探对象越来越复杂,地震技术成为推动海相碳酸盐岩由潜在领域向现实领域转化的核心;其次是资金保障,不断完善的地震采集方式、逐步强化的参数有效地提高了原始地震资料信噪比,资料处理解释软硬件环境建设为更高精度的成像处理和解释方法应用奠定资源基础,为地球物理工作者提供了更加宽阔的施展空间;第三是地质认识深化与技术进步相互的促进,为地震技术快速发展提供契机。

4 深层海相碳酸盐岩地震技术需求与发展

地质评价认为,中国陆上深层海相碳酸盐岩油气勘探在今后 5-10 年仍以三大盆地为重点,地震勘探面临的技术挑战仍然体现在三个方面:首先是地震采集。塔里木盆地的大沙漠地表、四川盆地的丘陵及高陡山地地表、鄂尔多斯盆地的黄土塬地表是采集技术攻关重点;其次地震资料处理。深层碳酸盐岩领域埋深普遍更深,地质评价阶段埋深将会深达 6000-10000m,甚至更深,提高深层地震资料信噪比、分辨率是处理技术攻关重点;第三是储层预测。现阶段储层研究表明,中国海相碳酸盐岩广泛发育沉积-成岩型、层间-层内溶滤型和埋藏-热液改造型三类有效储层,储层非均质性强,气水关系复杂,提高储层、裂缝预测精度和流体预测精度,实现定量化雕刻是解释技术攻关的重点。

4.1 深层海相碳酸盐岩地震勘探技术需求

上述基本认识是基于目前勘探涉及深度范围内形成的,进入到更深层系情况可能会更加复杂。首先,深层-超深层地震资料的信噪比会更低,只有有效地提高地震资料信噪比,让地质家能够“看清楚”深层地层接触关系,才有可能开展区带及目标优选。以塔里木盆地为例,制约深层地震资料信噪比提高的主要因素来自于两个方面,首先是地表低降速带的“屏蔽”作用,疏松的沙漠地表对激发信号的吸收衰减作用严重影响地震波能量下传,致使深层反射能量极弱;其次是上覆“过路”层系中不均匀分布的火山岩等特殊岩性体“屏蔽”和“干涉”作用,厚度较大的火山岩屏蔽作用较强,厚度较薄以及正常沉积层序之下地震波能量较强,导致深层目的层反射同相轴出现能量强弱关系变化,信噪比低,成像出现较大的位置误差,并使致同相轴动力学特征失真,为储层预测埋下“隐患”。

其次,随着深度的增加,地震信号的频率衰减和失真更加严重,深层强反射界面“屏蔽”影响突出。如塔里木盆地寒武系顶界(Tg7)、震旦系顶界(Tg8)等强反射界面将不整合面之下内幕反射完全屏蔽(吸收衰减),基于地震反射动力学特征的反演及属性分析存在严重的失真现象。

因此,针对深层碳酸盐岩首先需要发展提高信噪比的采集处理技术,其次,发展针对深层目标的相对保真成像和提高分辨率处理技术,三是发展针对深层目标的重磁电震联合反演技术,提高深层目标的综合评价精度。

4.2 深层海相碳酸盐岩地震勘探技术发展原则

三大盆地深层海相碳酸盐岩领域是我国陆上油气勘探的潜在领域,但由于目标深、储量丰度低,勘探技术,尤其是地震勘探技术发展需要考虑技术的经济适用性。

4.2.1 技术发展的经济性原则

在三大盆地深层具有广阔的待探范围内开展领域及区带评价,二维地震应是首选。塔里木盆地塔东地区和塔西南地区各有十万平方公里左右的勘探面积,现有的地质评价是基于多年积累的大量二维老资料和少量三维资料。这些资料排列长度较短,深层信噪比很低,资料品质不能满足深层评价要求是“久攻未克”主要制约因素。三维地震资料可以有效提高成像精度,但偌大的范围内部署三维地震经济上难以承受,高品质二维地震勘探应是区域评价中的首选,并重视重磁电技术在深层领域评价、区带优选中的应用。

4.2.2 技术发展的时效性原则

重新采集周期较长,需要在现有资料基础上积极探索提高深层资料信噪比的技术途径,对现有资料进行重新处理解释,提高深层目标评价的实效。在塔里木盆地和四川盆地积累了大量二维地震资料,尽管目前多数难以满足深层领域地质评价需求,但仍不失为挖掘处理潜力的基础,关键是迅速找到提高深层资料信噪比的技术

方案。前述塔里木盆地深层地震勘探三个“屏蔽”问题,技术人员已经开展了初步的尝试,取得了一定的地质效果,深层成像有所改善,应该成为现阶段技术攻关的重点。

4.2.3 技术发展的适用性原则

在深层领域区带评价基础上部署三维地震落实钻探目标,是近年来海相碳酸盐岩领域突破与拓展的有效方式,在三维部署中采用国际地球物理界积极推崇的“两宽一高”(宽频带、宽方位、高密度)地震勘探技术,需要充分关注这一技术的认识“盲区”和适用性。陆上高密度宽频技术要求观测系统属性均匀,目前主要在中东、非洲等广袤沙漠中应用。中国石油虽然野外地震采集技术设计较为规范,但针对新形势下的采集设计存在几个问题:参数计算基于水平层状假设、未完全考虑叠前成像的问题、未考虑目标层叠前预测的问题、未完全考虑目的层评价需求(深度、丰度、技术措施)和成本问题。在大道数、高成像道密度要求下,陆地三维地震采集需要几百吨的电子设备、庞大的队伍、大量的车辆、覆盖几百上千平方公里的农田、山地、工厂、持续时间数月,因此,需要充分考虑技术、HSE、减少成本的要求,在最低环境冲突和成本下形成适合目标成像和储层预测需求的采集技术方案十分重要。

综上所述,针对深层领域的地震勘探技术发展,经济性、时效性和适用性是三个相互影响的因素,需要统筹兼顾。

5 结 论

(1) 中国陆上发育的深层海相碳酸盐岩,具有常规烃源岩和源岩内滞留液态烃裂解两类烃源灶都可以规模供烃;受顺层、层间两类岩溶和埋藏、热液两类白云石化作用控制,深-超深层碳酸盐岩仍可以发育规模有效储层;递进埋藏和退火受热耦合作用,部分海相烃源岩可以跨构造期成藏,深层碳酸盐岩富油更富气;中国陆上深层碳酸盐岩具备大面积、规模成藏的有利条件,可以形成大油气田。

(2) 近几年,随着中国陆上海相碳酸盐岩油气勘探取得长足发展,地震勘探技术有了突破性发展,已经形成了针对不同地表条件、不同碳酸盐岩储层及油气藏类型的地震勘探配套技术,为深层碳酸盐岩领域勘探突破与快速增储提供了可靠的技术保障。

(3) 陆上深层海相碳酸盐岩油气勘探潜力可能超出预计,是我国未来油气勘探发展的重要的接替领域。但现阶段地震技术难以以满足深层领域、区带、目标评价需求,需要进一步发展旨在提高深层资料品质的地震采集处理解释技术。

(4) 深层碳酸盐岩地震勘探技术发展,需要面向深层领域地质条件的特殊性,发展旨在提高深层地震资料信噪比、分辨率的保真处理技术和储层预测技术,为深-超深层碳酸盐岩油气勘探提供有效的技术保障。

参 考 文 献

- [1] 赵文智, 汪泽成, 张水昌, 等. 中国叠合盆地深层海相油气成藏条件与富集区带[J]. 科学通报, 2007, 52(增1): 9-18.
- [2] 赵文智, 张光亚, 王红军, 等. 中国叠合含油气盆地石油地质基本特征与研究方法[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(2): 1-8.
- [3] 赵文智, 王兆云, 王红军, 等. 再论有机质“接力成气”的内涵与意义[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(2): 129-135.
- [4] 赵文智, 王兆云, 张水昌, 等. 有机质“接力成气”模式的提出及其在勘探中的意义[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(2): 1-7.
- [5] 赵文智, 沈安江, 胡素云, 等. 中国碳酸盐岩储集层大型化发育的地质条件与分布特征[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 1-12.
- [6] 刘伟, 孟庆洋, 张光亚, 等. 古老碳酸盐岩层系油气储层地质特征[J]. 海相油气地质, 2010, 15(1): 15-20.
- [7] 张宝民, 刘静江. 中国岩溶储集层分类与特征及相关的理论问题[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(1): 13-29.
- [8] Robert G. Loucks. Paleocave Carbonate Reservoirs: Origins, Burial-Depth Modification, Spatial Complexity, and Reservoir Implications[J]. AAPG Bulletin, 83(11): 1795-1834.
- [9] 李荣, 焦养泉, 吴立群, 等. 构造热液白云石化: 一种国际碳酸盐岩领域的新模式[J]. 地质科技情报, 2008, 27(3): 35-40.
- [10] 赵文智, 张光亚, 何海清, 等. 中国海相石油地质与叠合含油气盆地[M]. 2002, 北京: 地质出版社.
- [11] 赵文智, 汪泽成, 胡素云, 等. 中国陆上三大克拉通盆地海相碳酸盐岩油气藏大型化成藏条件与特征[J]. 石油学报, 2012, 33(S2): 1-10.
- [12] 汪泽成, 赵文智, 胡素云, 等. 我国海相碳酸盐岩大油气田油气藏类型及分布特征[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(2): 153-160.