

文章编号:1672-9854(2007)-04-0021-16

四川盆地天然气藏的破坏与保存条件剖析

姚雪根

(中国石油浙江油田公司)



姚雪根

摘 要 天然气藏勘探的成功或失利,取决于气藏圈闭的封堵系统和散失系统。介绍了四川盆地气藏圈闭封堵系统和散失系统的类型、分布范围和对气藏圈闭的保存和破坏作用。气藏圈闭封堵系统的优劣取决于圈闭的有效封堵面与区域盖层的有效整体封闭条件和区域水动力停滞带环境条件,封堵系统良好的圈闭,勘探成功率高。气藏圈闭散失系统由缺乏区域盖层有效整体封闭条件的剥蚀区、区域水动力自由交替带环境、通断层或潜伏通断层组成。散失系统导致圈闭失效,从而造成勘探失利。通过对四川盆地天然气藏的破坏与保存条件的多个实例剖析,提出在四川盆地及我国南方海相天然气勘探中应当重视对天然气藏破坏与保存条件的研究,以利于天然气藏勘探区块、目标的选择和勘探效率的提高。

关键词 四川盆地;油气勘探;气藏封堵系统;气藏散失系统;油气藏保存条件

中图分类号:TE112.126 **文献标识码**:A

姚雪根 1937年生,高级工程师。1956年毕业于北京石油地质学校石油地质专业。长期从事川渝鄂湘浙赣和我国南方的油气勘探研究。主要成果有《越南安州盆地考察研究报告》、参与《中国石油地质志》和《山地地球物理勘探技术》的编写。联系地址:310023 浙江省杭州市荆山岭

四川盆地是我国西南地区天然气勘探开发的重要基地,盆地内分布有众多的气藏,天然气资源十分丰富,成为我国西气东输的重要源头。长期以来,在四川盆地天然气的勘探开发和研究中,对气藏的破坏与保存条件是天然气藏勘探成败的关键已形成了共识。

对四川盆地天然气藏的破坏与保存条件进行剖析,将不仅有利于四川盆地勘探区块和目标的选择以及勘探效率的提高,而且也有利于我国类似天然气藏的勘探与开发。

1 封堵系统和散失系统——天然气成藏和勘探成败的关键

四川盆地预测的天然气资源量近 $7.2 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 探明储量近 $1.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 年产量 $116.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上,是个天然气资源丰富的盆地,也是个天然气成藏地

质条件比较好的盆地,这是毋庸置疑的。然而,在四川盆地的油气勘探开发中,构造勘探的成功率一般为 70% 左右,在川东地区则仅为 50% 左右^①,许多勘探前被看好的构造在实际勘探中失利。

事实表明,构造勘探的成功或失利,取决于天然气藏的封堵系统和散失系统。气藏的封堵系统和散失系统是构造圈闭有效与失效的综合体现,也是四川盆地天然气成藏和天然气勘探成败的关键。

1.1 天然气藏的封堵系统

天然气藏的封堵系统由各圈闭的有效封堵面和区域盖层的有效整体封闭条件以及区域水动力停滞带环境条件所组成。封堵系统良好的有效圈闭,勘探成功率高。

本节以典型的建南气田为例来论证气藏封堵系统的作用与意义。

收稿日期:2005-05-31;改回日期:2007-07-20

① 徐克定,陈劲人,姚雪根.四川盆地川东、川西地区天然气成藏条件调研与鄂西渝东、楚雄盆地类比研究报告.杭州南华石油技术开发有限公司,2001.

建南气田位于四川盆地东南缘石柱复向斜腹部, 为一个北东向中低丘背斜, 出露侏罗系上统沙溪庙组, 闭合面积 172.4 km^2 , 闭合度 264 m 。经勘探开发, 获得了四个工业性气层 (T_1j^1 、 T_1f^3 、 P_2^2 、 C_2), 工业产气井 17 口, 控制不同类型气藏 (裂缝系统) 8 个, 气田探明储量 $98.17 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。建南气田是个多产层、多气藏 (圈闭) 类型的气田, 几乎四川盆地所有的气藏类型均可在建南气田找到。建南气田之所以会形成多产层多类型的气藏 (圈闭), 除了有效的储产层条件外, 有效的保存条件——气藏的封堵系统, 是其决定因素。

1.1.1 建南气田的气藏类型

建南气田的 8 个气藏主要有以下 5 种圈闭类型^②:

(1) 地层—构造复合圈闭气藏

建南气田黄龙组 (C_2h) 气藏属此种类型 (图 1a)。黄龙组仅分布于建南气田北高点, 有效储产层为溶孔白云岩, 气藏南界为地层剥蚀零线控制, 气水分布受今构造控制, 低部位的井产水。圈闭要素按二叠系底构造图计算, 最低闭合线为 -3200 m , 高点海拔在 -3020 m , 闭合度为 180 m 。气水界面在 -3194 m , 含气高度达 174 m , 含气充满度达 96.7% 。四川盆地东北部石炭系主力气藏大多为此类气藏。

(2) 生物礁岩性—构造复合圈闭气藏

位于建南气田北高点的长兴组 (P_2c), 已查明为一潜伏生物礁体, 具有工业价值的气井均位于生物礁体范围内, 而礁外各井虽经多次酸化压裂均无工业气流产出。天然气有效储产层为溶孔白云岩。但由于白云岩横向变化大, 加之裂缝的串通, 礁体上的生物灰岩起不到隔层作用, 白云岩为块体含气。气藏的北、西、南三个边界与生物礁体边界一致, 为礁外致密灰岩岩性遮挡。高部位的井产气, 低部位的井产水。气水分布受今构造控制, 气水界面海拔在 -2580 m , 含气高度为 140 m 。长兴组顶面构造图闭合度达 150 m , 气藏充满度为 93.3% 。气藏为具有边水的生物礁岩性—构造复合圈闭的块状气藏 (图 1b)。四川盆地东北部天然气主产区时有此类气藏发现。

(3) 粒屑滩岩性—构造复合圈闭气藏

在建南气田南高点的飞仙关组三段 (T_1f^3) 气藏 (图 1c), 为一具有边水的岩性—构造复合圈闭层状气藏, 其高部位的井产气, 低部位的井产水。气水分布受今构造控制, 气水界面海拔 -2144.5 m , 含气高度 150 m 。飞仙关组三段顶面构造图闭合度 230 m , 气藏充满度 65% 。气藏东部边界为石圣—跨石庙断层 (F_2) 遮挡, 北部为岩性控制, 西南部构造控制气水界面。四川盆地东北部飞仙关组主力气藏大多为此类气藏。

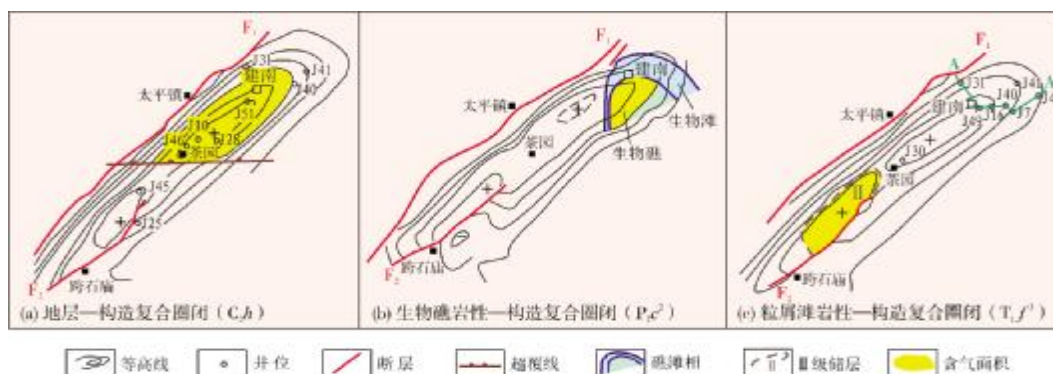


图 1 四川盆地建南气田主要气藏类型

C_2h 中石炭统黄龙组; P_2c 上二叠统长兴组; T_1f 下三叠统飞仙关组。 F_1 太平镇断层; F_2 石圣—跨石庙断层

(4) 岩性圈闭气藏

主要发育于建南气田北高点飞仙关组三段, 在鲕粒滩体内发育互不连通的透镜状针孔白云岩孤立体, 为气水界面各不相同的点状气藏。如构造翼部的 J31

井, 有 4 m 针孔白云岩产水, 顶界海拔在 -2325.88 m 。东北倾没端的 J42 井, 有一层 3 m 厚的针孔白云岩, 顶界海拔在 -2351.62 m , 却产气 $0.35 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (无水)。此类气藏在开发过程中互不连通, 如 J36 井针孔白云

② 姚雪根, 陈劲人, 戴汉地. 鄂西—渝东地区勘探成果与现状及评价报告. 杭州南华石油技术开发有限公司, 2004.

岩产层, 1979 年地层压力下降至 9.3 MPa, 为枯竭井;而相距仅 1 km 的 J10 井同层位针孔白云岩产层, 至 1999 年地层压力还有 19.71 MPa。此类气藏在四川盆地的嘉陵江组、飞仙关组、茅口组、栖霞组等气层中普遍可见, 星罗棋布。

(5) 裂缝圈闭气藏

裂缝圈闭在四川盆地称为“裂缝系统”。由于不同构造部位发育许多相互不连通的裂缝网, 它们以不同的气水界面自成系统地出现, 一个裂缝系统可组成一个独立的气藏。建南气田北高点嘉陵江组一段 (T_{1j}^1) 的 J32 井裂缝系统、飞仙关组三段的 J51 井裂缝系统均构成了独立的裂缝圈闭气藏。此类气藏在四川盆地的中三叠统雷口坡组、下三叠统嘉陵江组和飞仙关组、下二叠统茅口组和栖霞组等气层中普遍可见, 屡见不鲜。

建南气田及川东北地区、四川盆地所获的各类气藏中, 除岩性气藏外, 均与今构造密切相关, 气水分布无一例外地受今构造控制。因此, 构造圈闭是控制四川盆地天然气聚集的主要圈闭类型, 天然气勘探的主要对象是构造圈闭, 地层、岩性与构造组成的复合圈闭是勘探中优选的目标。

裂缝无论在裂缝圈闭气藏中, 还是在地层—构造复合圈闭、岩性—构造复合圈闭、岩性圈闭的气藏中, 都是天然气渗滤和产出的主要空间。“无缝不高产”, 这一四川盆地勘探开发中的经典总结, 说明裂缝在各类气藏中的重要性和产能对裂缝的依赖性, 因而在各类气藏的勘探开发中都要优选裂缝发育的构造部位, 以争取获得最大的天然气产能。

1.1.2 气藏有效封堵面的类型及作用

圈闭的有效性取决于圈闭中各封堵面的有效性, 这是组成天然气藏封堵系统的基础。没有有效的封堵面, 就没有气藏的封堵系统。建南气田各气藏圈闭勘探开发的资料证明, 在良好的区域盖层保护下, 有效封堵面包括以下 5 种类型^②:

(1) 直接盖层封堵面

直接盖层封堵面系指盖层直接位于气藏 (层) 之上所形成的封堵面。它不仅在圈闭的垂向上能有效阻止天然气向上逸散, 而且当圈闭为背斜构造时, 直接盖层还起着侧向封堵面的作用。建南气田 4 个工业气层的直接盖层封堵面分别为梁山组—栖霞组

下部 ($P_{1l}-P_{1q}^1$)、长兴组三段—飞仙关组一段 ($P_{2c}^3-T_{1f}^1$)、飞仙关组三段顶部—四段 (T_{1f}^{3-4})、嘉陵江组二段 (T_{1j}^2)。它们的岩性有硬石膏、泥质白云岩、泥灰岩、泥岩及致密细粉晶灰岩, 厚度 30~100 m。它们的遮挡性极好, 表现在各相邻气层间的流体性质、地层压力差异明显。

在四川盆地中, 众多不同层位气藏 (气层) 的直接盖层包括膏盐岩、泥质岩、煤岩、泥灰岩、泥质灰岩、泥质白云岩、致密细粉晶灰岩、致密细粉晶白云岩, 以及泥质粉砂岩、致密砂岩。这些岩层, 特别是膏盐岩、泥质岩、煤岩, 在良好的区域盖层保护下, 只要未遭淡水淋滤和断层破坏, 都可以起到良好的直接盖层封堵面的作用。例如, 根据川东南嘉陵江组气藏的勘探研究, 硬石膏层单层厚度大于 3 m 就可以阻挡油气向上散失, 成为良好的直接盖层。但这些岩层如果没有良好的区域盖层保护, 就不能起到良好的直接盖层封堵面的作用, 比如膏盐岩和碳酸盐岩, 若遭受淡水的淋滤, 则可完全丧失直接盖层封堵面的作用。

在上述组成封堵面的不同岩类中, 对煤岩的封堵性应当引起重视。如重庆中梁山煤矿的茅口组气藏^③ (图 2), 其直接盖层封堵面为上二叠统下部的龙潭组 (P_{2l}) 煤系地层, 厚度约 500 m, 且在地表已裸露几十米, 其上缺乏区域性盖层的保护, 而其下的茅口组 (P_{1m}) 石灰岩气藏依然储存有天然气。从 1957 年至 1965 年 9 月, 大约从 0.2 km² 面积内开凿的 2 000 多米茅口组石灰岩巷道中共采出天然气约 4 700×10⁴ m³。茅口组残存气藏的直接盖层封堵面无疑依赖于其上覆龙潭组煤系的整体构造以及富含水的高瓦斯煤系地层。

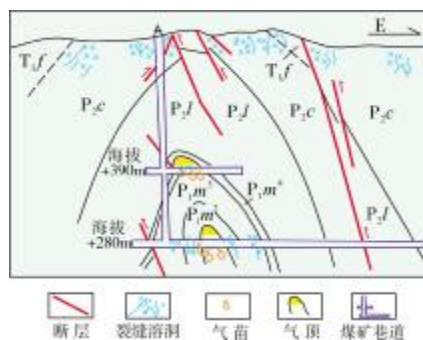


图 2 重庆中梁山背斜南端构造剖面图

P_{1m} 下二叠统茅口组; P_{2l} 上二叠统龙潭组;
 P_{2c} 上二叠统长兴组; T_{1f} 下三叠统飞仙关组

^③ 姚雪根, 陈劲人. 四川盆地綦江—涪陵区块油气勘探调研评价报告. 杭州南华石油技术开发有限公司, 2002.

(2) 地层封堵面

地层封堵面系指因储产层沿上倾方向或水平方向缺失而构成的封堵面。这类封堵面主要发生于地壳振荡运动比较频繁的时期, 因储产层遭受剥蚀, 与其直接接触的上下层位泥质岩盖层形成了地层封堵面。尔后, 造山运动形成构造圈闭, 组成了地层—构造复合圈闭, 继而形成地层—构造复合圈闭气藏。如建南气田北高点石炭系黄龙组, 在 J28 井与 J45 井间存在剥蚀零线, 在剥蚀零线以南, 下二叠统梁山组泥岩与泥盆系、志留系泥页岩相接触, 构成建南石炭系地层—构造复合气藏圈闭 (图 1a) 的良好封堵面。

四川盆地川东地区石炭系主力气藏为典型的地层—构造复合圈闭气藏。这一地区志留纪末加里东运动后长期处于隆升剥蚀阶段, 直至晚泥盆世早期, 为上扬子古陆的组成部分。晚泥盆世海水自东向西侵入本区, 形成滨岸相沉积的海湾, 泥盆纪末的柳江运动本区隆升, 晚泥盆纪沉积遭受剥蚀, 剥露志留系泥砂岩。石炭纪, 本区发展为局限海台地相海湾, 为各类碳酸盐岩沉积 (特别是晚石炭世中期的潮坪白云岩沉积) 形成石炭系气藏的有效储产层奠定了基础 (图 3)。石炭纪末期的云南运动使本区不均衡隆升, 石炭系遭受不同程度的剥蚀, 在许多地方形成石炭系被剥蚀殆尽的天窗, 形成岩溶地貌及岩溶储产层 (图 4)。早二叠世早期, 四川盆地及扬子地区整体振荡下沉, 区内沉积了下二叠统底部梁山组泥页岩夹煤系地层, 在石炭系地层剥蚀殆尽的地区, 与志留系泥页岩直接接触, 组成了地层封堵面。

(3) 岩性封堵面

岩性封堵面系指因储产层岩性或储集性能在纵横向上变化或消失而构成的封堵面。在建南气田, 气藏圈闭中起封堵作用的岩性封堵面有: 飞仙关组三段中一下部内碎屑—核形石灰岩储产层, 在鞍部 J30 井附近相变、尖灭, 构成了南高点飞仙关组三段岩性—构造复合气藏圈闭 (图 1c) 的北部封堵面。在北高点长兴组生物礁岩性—构造复合圈闭气藏 (图 5), 主要储产层为礁体内的次生白云岩, 其上直接封堵面为长兴组三段 (P_2c^3) 含泥质、硅质泥晶灰岩 (60~70m) 及飞仙关组下部的含泥质石灰岩和底部的黑色页岩, 总厚度 250~300m。其横向封堵面为礁体尖灭于致密灰岩的岩性封堵面,

礁体的北、西、南三边界已被 J41、J26、J49 及 J32 井证实, 礁体的边界就是气藏的边界。北高点飞仙关组三段针孔状白云岩的透镜体孤点状气藏更是完全被岩性封堵面所封堵。这些均证明了岩性封堵面也是良好的封堵面。

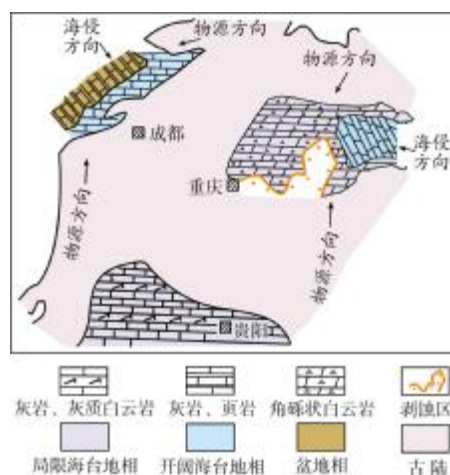


图3 四川盆地中晚石炭世沉积相图



图4 四川盆地上石炭统储层有效厚度图

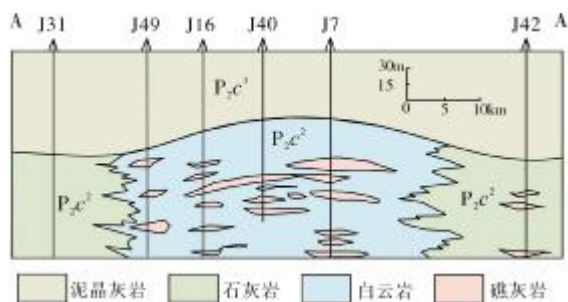


图5 四川建南气田上二叠统长兴组 (P_2c) 生物礁气藏剖面图
A—A' 剖面位置见图 1c

岩性封堵面在四川盆地的震旦系灯影组气藏, 石炭系黄龙组气藏, 二叠系栖霞组、茅口组、长兴组气藏, 三叠系飞仙关组、嘉陵江组、雷口坡组气藏中均普遍存在。岩性封堵面主要发育的区域有: 碳酸盐岩台地边缘台缘浅滩、台缘礁, 开阔海台地台内滩、台内礁、台内生物滩, 局限海台地台内浅滩, 蒸发海台地藻坪、藻滩等沉积相带, 以及细粉晶白云岩、隐藻白云岩、角砾白云岩、粒屑白云岩、粒屑灰岩、生物灰岩等岩性变化的地区。

如川东黄泥堂—云安厂—天东地区的长兴组生物礁岩性—构造复合圈闭气(水)藏(图6), 主要储产层为礁体内的次生白云岩, 封堵面为礁体尖灭于致密灰岩的岩性封堵面。

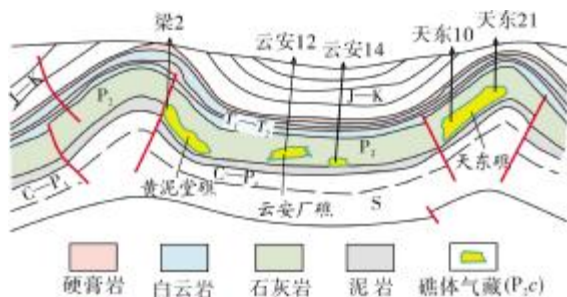


图6 川东黄泥堂—云安厂—天东地区上二叠统长兴组(P_2c)生物礁气藏成藏模式

再如川中龙女寺气田下二叠统栖霞组白云石化岩块圈闭气藏(图7), 主要储产层为次生白云石化白云岩块, 其上直接封堵面为茅口组底部(P_{1m}^1)泥质岩和泥灰岩, 厚 55~60m。其纵横向封堵面为储产层四周未经白云石化的致密石灰岩^[1]。

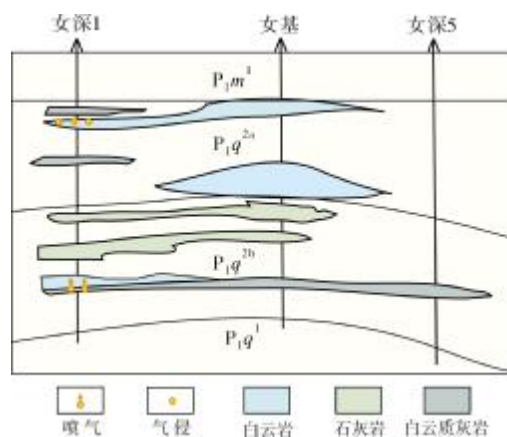


图7 川中龙女寺气田下二叠统栖霞组岩性剖面图
 P_{1q} 下二叠统栖霞组; P_{1m} 下二叠统茅口组

又如川东南地区的下三叠统嘉陵江组粒屑滩岩性—构造复合圈闭气藏^[1](图8), 主要储产层为各类碳酸盐岩台地内暴露浅滩相粒屑灰岩和粒屑白云岩。这类气藏在四川盆地的下三叠统嘉陵江组和飞仙关组中广泛分布, 且在下古生界和下二叠统栖霞组中也有分布。它们多呈透镜状, 纵向上成组出现裂缝—孔隙型或孔隙型储渗体, 纵横向上组成了众多的粒屑滩岩性—构造复合圈闭气藏或粒屑滩岩性圈闭气藏。这些气藏的直接封堵面为每个气藏上覆的膏盐层, 纵横向封堵面为透镜状粒屑滩体四周的致密灰岩。

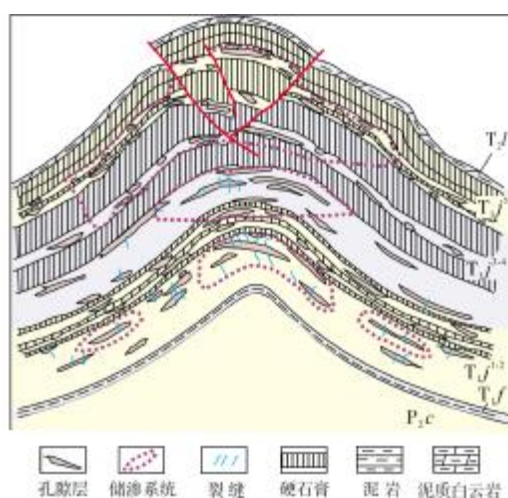


图8 川东南地区下三叠统嘉陵江组储集层模式图
 P_2c 上二叠统长兴组; T_1f 下三叠统飞仙关组;
 T_{1j} 下三叠统嘉陵江组; T_{2l} 中三叠统雷口坡组

(4) 断层封堵面

断层封堵面系指沿潜伏逆冲(或逆掩)断层断面或上延终端所形成的气藏封堵面。建南气田东南翼的石圣—跨石庙潜伏逆冲断层具有断层封堵面作用(图1)。该断层与构造走向一致, 倾向北西, 倾角 50° 左右, 延伸长度 16 km, 断距 20~510 m (一般 300 m), 切割南高点飞仙关组三段(T_{1f}^3)气藏圈闭高点, 向上消失于中三叠统巴东组下部。J25井井下钻遇此断层, 是由 5 个断点(T_{1j}^1 、 T_{1f}^4 、 T_{1f}^2 、 P_{2c}^2 、 P_{2c}^1)组成的断裂带。在第二个断点下盘飞仙关三段气层(井深 3 484~3 535 m), 经中途测井产气 $0.99 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 说明此断层虽切割飞仙关三段气藏的顶部, 但气藏仍得以保存, 具有封闭性。而起封闭作用的由断层上延消失终端的巴东组下部泥质岩和嘉陵江组硬石膏层组成的直接封堵面, 阻止了该气藏的气向上逸散。

断层封堵面在四川盆地构造气藏上分布较多,特别是高陡构造断下盘潜伏构造上的潜伏断层。如川东沙坪场石炭系气藏(图9),为一个中陡潜伏断背斜,二叠系底闭合面积84.77 km²,闭合度650 m。6口探井均为中高产气井,控制含气面积为70.58 km²,气藏高度达550 m,探明储量为397.71×10⁸ m³。气藏南北两端为石炭系地层遮挡(或岩性遮挡),东西两侧为沙1和沙2两个潜伏断层所阻,为构造—地层复合圈闭气藏。沙1和沙2潜伏断层为气藏东西两侧的边界,其上延终端消失于嘉陵江组中—下部,其途经的下二叠统、上二叠统、下三叠统飞仙关组和嘉陵江组中的各类岩石均成为气藏的封堵面,特别是断层消失终端的嘉陵江组膏盐岩是断面阻止气藏逸散的主要层位和岩类。

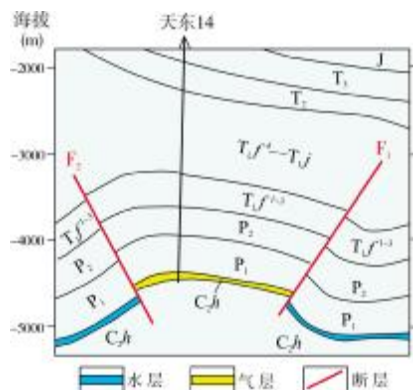


图9 川东沙坪场气田 91-D13 测线综合解释剖面图

F₁ 沙1断层; F₂ 沙2断层

(5) 非均一裂缝封堵面

非均一裂缝封堵面系指裂缝系统在纵横向延伸方向由于裂缝发育的不均一性所造成的封堵面,此为裂缝圈闭气藏的封堵面,主要受不同构造部位不同应力及强度的控制。“占高点,沿长轴,沿断裂,沿扭曲,沿转折”——这是四川盆地构造裂缝发育的基本规律。而在构造的纵横向上常常分布有众多的裂缝系统,形成众多的裂缝圈闭气藏。相邻裂缝圈闭气藏间则为裂缝不发育的非均一裂缝封堵面。

此类封堵面在四川盆地的雷口坡组、嘉陵江组、飞仙关组、茅口组、栖霞组等裂缝圈闭气藏中普遍可见。如建南气田北高点嘉陵江组一段 J32 井、飞仙关组三段 J51 井裂缝圈闭气藏的封堵面均属非均一裂缝封堵面。

又如川南纳溪气田的茅口组构造裂缝圈闭气

藏^[1](图10),地面上它为东西向单箱状背斜,闭合面积102 km²,闭合度650 m,南翼陡(12°~47°)北翼缓(7°~12°),地面未发现断层,圈闭完整。而在地腹,茅口组闭合面积85.5 km²,闭合度850 m,北翼倾角10°,南翼倾角10°~14°。圈闭范围内分布有5个高点,为东西向串联。有断层28条,均为小逆断层,除南翼陡带走向逆断层最大断距可达680 m外,一般均仅数十米。主要断层组系为东西向延伸的走向逆断层,多分布于背斜轴部,背斜北翼还分布有北东、北西两组逆断层。经勘探开发,茅口组纵横向上共分布有18个裂缝系统,相邻裂缝圈闭气藏间为裂缝不发育的非均一裂缝封堵面。

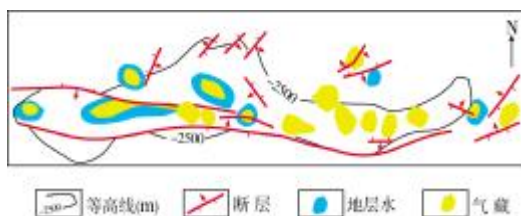


图10 川南纳溪气田下二叠统茅口组多系统背斜气藏平面图

1.1.3 区域盖层的有效整体封闭条件

建南气田位于石柱复向斜整体封存构造保存单元区中心,轴部出露最老地层为侏罗系下沙溪庙组,侏罗系—中三叠统巴东组(T₂b)碎屑岩类区域盖层厚度大于800 m,有效地保护了下三叠统嘉陵江组厚110 m左右的膏盐类(直接盖层封堵面)免遭淡水淋滤,使建南气田三叠系—石炭系碳酸盐岩气藏纵向上处于整体封存环境。这是建南气田晚期成藏保存的主要条件,如果没有这个条件,则气藏各种封堵面的作用也就会失效。

四川盆地除威远气田浅部气藏、水藏外,所有气田及气藏均具有良好的区域盖层这一有效整体封闭条件。这些气田和气藏均位于不同的整体封存构造保存单元区,地面构造出露白垩系—侏罗系的不同层位,侏罗系—中三叠统巴东组或白垩系—巴东组碎屑岩类区域盖层厚度大于1000~3000 m,有效地保护了下三叠统嘉陵江组厚40~230 m左右的膏盐层(直接盖层封堵面)免遭淡水淋滤,这是四川盆地晚期成藏保存的主要条件。同样地,如果没有这个条件,则气藏各种封堵面的作用也就失效了。

1.1.4 区域水动力的停滞环境

建南气田位于石柱复向斜中心,远离其东西两

侧的齐岳山、方斗山供排水区,加之气田区域性储产层缺失或部分缺失,以及储产层岩相、岩性的变化,从而使地下水交替不畅,形成了区域水动力的停滞环境。四个工业气层的边底水均处于水动力的停滞交替环境,地下水总矿化度均在 $10 \times 10^4 \text{ mg/L}$ 以上,属 CaCl_2 水型。

四川盆地所有气田与气藏,均远离盆地周缘的主要供排水区和盆内方斗山等局部供排水区,加之不同层位储产层的地层、岩相、岩性变化,形成了四川盆地大区域的水动力停滞环境。不同层位储产层的边底水均处于水动力的停滞交替环境,地下水总矿化度均在 $(1.5 \sim 296.49) \times 10^4 \text{ mg/L}$,为 CaCl_2 水型。

同造山前陆盆地的整体封存构造保存单元,区域水动力的停滞环境,加上直接盖层和地层、岩性、断层、非均一裂缝等有效封堵面所共同组成的天然气藏封堵系统,是建南气田天然气藏保存的主要条件。可以说,有否存在天然气藏封堵系统是天然气成藏和勘探成败的关键,这一结论亦由鄂西—渝东地区及四川盆地天然气藏的勘探开发史料所证实。

1.2 天然气藏的散失系统

天然气藏的散失系统由缺乏区域盖层有效整体封闭条件的剥蚀区、区域水动力自由交替带环境、通天断层或潜伏通天断层所组成。这些是造成失效圈闭勘探失利的重要因素。

1.2.1 气藏散失系统形成的环境

四川盆地天然气藏的散失系统主要分布于四川盆地周缘的龙门山造山带、大巴山造山带、江南造山带及湘鄂西—渝东南地区、渝黔—川滇边界地区。作为区域盖层有效整体封闭条件的中三叠统—侏罗系前陆盆地在这里的大部分地区已剥蚀殆尽,大面积剥露海相原型盆地的震旦系—三叠系嘉陵江组碳酸盐岩地层,岩溶及大小、深浅断裂发育串通,多为地表渗入水系统的发育区、水文地质开启区、水动力供排水区,且形成了大面积的穿越流,其纵横向延伸可以很深很远(深度可达 $3000 \sim 5000 \text{ m}$,距离可达数百千米)。由于缺乏区域盖层的有效整体封闭条件和区域水动力的停滞环境,区内各种封堵面的作用也就失效,特别是嘉陵江组膏盐岩被淋滤溶蚀为岩溶角砾岩,对气藏的保存条件破坏极大,从而导致这些地区勘探的失利。

1.2.1.1 区域水动力自由交替带环境形成的气藏散失系统

根据湘鄂西地区水文地质与水动力条件研究^①,灯影组(Z_2d)存在区域性穿越流,其流向由西南往东北,由高水位向低水位流动(图 11)。供水区位于西南部,水位海拔 $900 \sim 700 \text{ m}$;泄水区位于东北部,水位海拔 $80 \sim 60 \text{ m}$;其间为承压区,水位海拔 $600 \sim 100 \text{ m}$ 。水位流向可分南北两个流向:南部近东西向,位于湘西北地区,以澧水为泄水口;北部呈北东向,位于鄂西地区,以长江为泄水口。

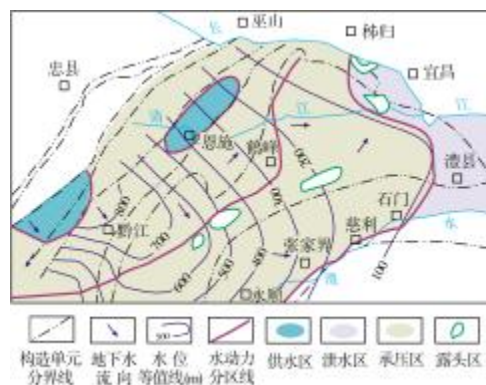


图 11 湘鄂西地区上震旦统灯影组区域水动力图

湘鄂西地区发育有多条北东—北东向延伸的大河大江,他们的流向与灯影组的穿越流相一致。如发源于齐岳山东麓的清江河,以北东向延伸四百多千米,在枝城汇入长江,流经了鄂西地区 T、P、C+D、S、O、E、Z 等层系所有地面碳酸盐岩间夹泥砂岩露头区以及鱼皮泽、茶山、白果坝、三岔、黄家垭、长岭岗、长阳、庙滩、宜都等所有构造,如一条巨大的穿越龙,横亘于鄂西的高山峻岭之中,其中在利川下三叠统碳酸盐岩露头区约有 8 km 钻入地下成为暗河。

1.2.1.2 高陡构造环境形成的气藏散失系统

在四川盆地东部的高陡背斜带上,分布有局部的天然气藏散失系统。这些系统主要分布于剥露二叠系—三叠系碳酸盐岩的断上盘主体背斜上,由于其缺乏中三叠统—侏罗系区域盖层,地表处于自由交替带的水动力环境,通天断层和潜伏通天断层发育,分布有局部的穿越流,因而天然气藏遭受破坏,勘探屡屡失利。而在主体背斜两翼的潜伏背斜上,由于其上覆中三叠统—侏罗系区域盖层,勘探目的层深埋地腹,处于停滞带的水动力环境,缺乏

通天断层或潜伏通天断层,各种直接封堵面封堵良好,从而形成了天然气藏的封堵系统,天然气藏得以良好保存,勘探屡屡成功。

如肖家湾断上盘主体高陡构造及其东西两翼的沙坪场构造、西河口潜伏构造。肖家湾断上盘主体高陡构造位于川东大天池—明月峡高陡背斜带中段,地表出露下三叠统嘉陵江组碳酸盐岩,通天断层、潜伏通天断层及岩溶发育,分布有局部穿越流等天然气散失系统,故造成圈闭失效,勘探失利。而其东侧的沙坪场和西侧的西河口潜伏圈闭,由于其地表中三叠统一侏罗系区域盖层覆盖,与肖家湾断上盘主体高陡构造间均为深向斜所隔,缺乏通天断层或潜伏通天断层,且处于停滞带的水动力环境,从而圈闭有效,主探目的层石炭系均获得了高产气藏。

1.2.2 实例剖析

四川盆地东缘的齐岳山高陡背斜带及其以东的湘鄂西地区,为缺乏区域盖层有效整体封闭条件的剥蚀区。区内于1966—1999年的三十多年里先后在宜都、庙滩、香龙山、刘家场、咸丰、旧司、茅坪、大溪、红岩溪、河捞子、洗马坪、茶山、楠木园、白果坝、李子溪、鱼皮泽、瞿扩峡、枫竹包共18个构造上钻探了36口探井,均因缺乏区域盖层有效整体封闭条件、地处区域水动力自由交替带环境、通天断层或潜伏通天断层发育、气藏各种封堵面失效而勘探失利。勘探失利的主要原因是区内大面积分布着天然气藏的散失系统,缺乏天然气藏的封堵系统。

实例 1——宜都构造的散失系统

宜都构造^④(图12)是湘鄂西地区于1966年继四川威远震旦系气田发现后为寻找威远式大气田而钻探的第一个地面“高老大构造”。宜都构造位于宜都—鹤峰高陡背斜带上。地面高点海拔70~110 m,出露最老层位为水井沱组(E_1sh),地表为寒武系碳酸盐岩组成的岩溶地貌。以中寒武统条带灰岩为标准层制图:轴向 105° ,隆起幅度达4400 m,面积为117 km²,北翼倾角 $45^\circ\sim 88^\circ$,南翼倾角 $20^\circ\sim 30^\circ$,其上断裂十分发育,仅正断层就有141条,为十分破碎的断块背斜。

宜都构造钻探浅井9口(井深704.34~1222 m),完钻层位为下寒武统水井沱组一下震旦统南沱组

(Z_1n),其中有8口井钻达主探目的层——上震旦统灯影组(Z_2d)。钻探结果仅在Y3井完井后井口冒可燃气(其中, CH_4 气占96.79%, N_2 气为0.02%)。而Y3井在井深965.20~970.34 m段和995.00~1018.00 m段灯影组的两次中途测试中,井内均出水含气,折算气量分别为1.196 m³/d和8.149 m³/d(其中, CH_4 气仅为7.55%~2.86%, N_2 气占89.42%~94.6%),不燃。宜都构造所钻的9口探井中,除Y6井钻达南沱组外,其他钻达灯影组的8口探井均产淡水(总矿化度为7300~8200 mg/L,属 Na_2SO_4 水型)。地层压力接近,为10.2~11.1 MPa;水位标高相近,为165.53~185.53 m。其气藏已遭受散失系统的严重破坏,Y3井完井后井口冒出的可燃气为气藏遭受严重散失破坏后的残存气。



图12 湘鄂西地区宜都背斜构造东段勘探成果图

类似情况还有该区咸丰构造的咸2井,井深49.71~1230.14 m,层位为 Z_2d-E_1 ,完钻测试无气,产少量水,而在搬家后发现井口冒气(其中, CH_4 气为87.84%~92.96%, N_2 气10.67~2.24%),可燃。

实例 2——鱼皮泽构造的散失系统

鱼皮泽构造位于利川复向斜带中部鱼皮泽构造带上,一直为区内下古生界勘探所看好的构造(图13)。鱼皮泽构造地面高点海拔1102 m,出露最老层位为志留系,地表为二叠系一下三叠统碳酸盐岩组成的岩溶地貌。以寒武系底编制的地震反射层构造图表明:轴向北东,闭合度100 m,闭合面积29.3 km²,为北东向短轴状背斜。其上断裂发育,分布有北东向的东倾和西倾两组走向逆断层,多数为通天断层或潜伏通天断层。其中 F_2 断层为从鱼皮泽构造西翼切向东翼的东倾走向通天断层,其断面横切深部Z—E—O构造顶部。

20世纪70年代在鱼皮泽构造顶部钻探了鱼1井。完钻深度3301.58 m,钻遇层位D— E_2 ;在

^④ 戴少武,张伯桥,严金泉.川鄂边区天然气勘探项目1994—1996年勘探部署总体设计.湖北省科技咨询服务中心石油学会分部,1994.

2 710.19—3 301.58 m 的中寒武统气浸显示段测试, 产 N_2 气 770~570 m^3/d (N_2 气占 91.73%, 而 CH_4 气仅占 7.82%,), 不燃; 而在完井 4 年后, 井口焊接砂眼处喷出天然气 (气中 CH_4 达 95%, N_2 仅 4.6%), 可燃, 当地农民作炊用。1998—1999 年, 也就是在钻探鱼 1 井 20 年后, 在鱼 1 井之东不足 100 m 处的构造顶部又钻探了利 1 井, 主探目的层为下寒武统石龙洞组 (E_1s) 和上震旦统灯影组 (Z_2d)。该井完钻井深 5 356 m, 完钻层位为灯影组, 钻遇层位 D—S—O— E —Z。钻探结果表明: 在石龙洞组漏失泥浆 172.3 m^3 , 经中途测试为水层, 压力系数为 0.84, 产液柱高度为 255.34 m, 计算日产水量为 13.12 m^3 。钻进中, 在灯影组有 4 m 放空井段, 漏失泥浆 621.8 m^3 , 经完井全井段 (4 452~5 280 m) 和顶部 (4 440~4 552 m) 测试, 为水层, 压力系数为 0.8 和 0.83, 计算日产水量 688.8 m^3 和 111.6 m^3 , 在完井测试后抽吸一周产水 201.23 m^3 , 水总矿化度为 12 675.7~13 212.95 mg/L, Cl⁻ 含量为 6 944~6 907 mg/L, 属 Na_2SO_4 水型。其气藏已遭受散失系统的严重破坏。由此推断, 鱼 1 井完井后在井口焊接砂眼处冒出的天然气为气藏遭受严重散失破坏后的残存气。

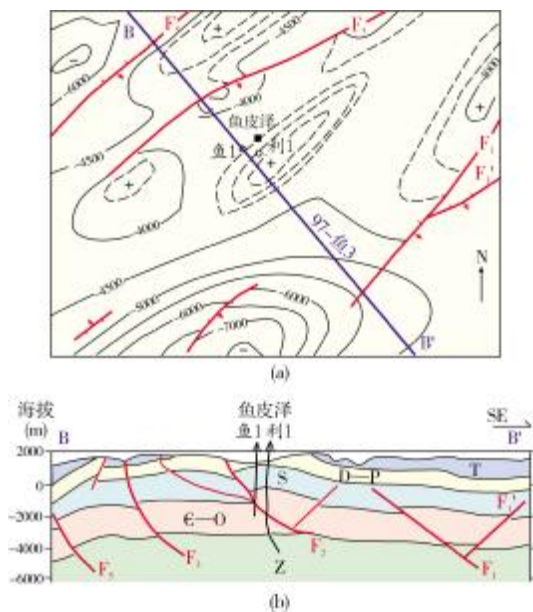


图 13 湘鄂西地区鱼皮泽构造带下寒武统地震反射构造 (a) 与地震解释剖面 (b) 图

实例 3——白果坝构造的散失系统

湘鄂西地区白果坝构造上的鄂参 1 井^④(图 14), 在构造上分布有多条通天断层, 完钻井深 2 990 m, 钻遇

层位 $E_2—E_1—Z_2—Z_1$ 。在井深 44~2 054 m 段 ($E_2—E_1$) 遇井漏有进无出, 漏速达 270 m^3/d , 漏失液可在附近地表喀斯特溶洞中返出。经对 $Z_2—Z_1$ 测试, 结果为水层, 产水量 3.024 m^3/d , 总矿化度 6 770 mg/L, 为 $Na_2HCO_3—Na_2SO_4$ 水型。

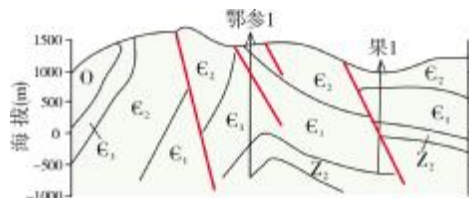


图 14 湘鄂西地区白果坝构造鄂参 1 井过井剖面

2 继承性前陆盆地的有无——决定气藏的破坏与保存条件

四川盆地天然气藏封堵系统的区域盖层是继承性的 $T_2—J$ (或 $T_2—E$) 前陆盆地, 它由大套泥砂岩间夹煤系地层、膏盐岩组成, 厚度 1 000~3 000 m (或 1 000~4 400 m)。

包括川东、川南、川西、川北、川中各主要油气区在内的四川盆地的主体为保存有继承性前陆盆地的地区, 这些区内为停滞带水动力环境, 上覆地层有效地保护了气藏封堵系统中的各种封堵面不被破坏, 特别是保护了膏盐岩直接盖层封堵面。因而这些地区多数为天然气藏封堵系统分布区, 大批圈闭有效, 从而获得了大量油气藏。

继承性前陆盆地的剥蚀地区多分布于四川盆地周缘及川东地区高陡构造带的主体构造地区, 区内为自由交替带水动力环境, 气藏封堵系统中的各种封堵面被破坏, 特别是膏盐岩直接盖层封堵面被破坏, 多数成为天然气藏散失系统分布区, 大批圈闭失效, 难以获得油气藏, 所见油气显示亦多为油气藏散失破坏后的残存油气。

由此可见: 继承性前陆盆地的有无是决定四川盆地天然气藏破坏与保存条件的主要区域地质背景。

2.1 四川继承性前陆盆地的发展演化

四川盆地继承性前陆盆地的发生发展经历了三个阶段, 这也是四川盆地及其周缘天然气藏形成及保存与破坏的三个阶段^①。

2.1.1 中印支期—早燕山期

中印支期—早燕山期 (T_2 — J) 为前陆盆地区域盖层发育的早期 (图 15a)。期内四川盆地 (含中扬子) 周缘的江南—雪峰、大巴山—大洪山、龙门山等造山带在板块挤压构造运动中先后形成, 成为 T_2 — J 前陆盆地的物源区。其中江南—雪峰、大巴山—大洪山造山带始于 T_1 末期, 其上缺失 T_2 — J 区域盖层。龙门山造山带始于 T_3 x^2 (须家河组二段) 末期, 其上缺失 T_3 — J 区域盖层。四川盆地 (含中扬子) 在 Z — T_1 海相原型盆地之上继承性沉积了 T_2 — J 前陆盆地区域盖层, 由大套泥砂岩间夹煤系地层、膏盐岩、碳酸盐岩组成, 厚度 1 000~3 000 m。 T_2 — J 前陆盆地不仅是 Z — T_1 海相原型盆地油气藏的区域盖层, 也是陆相盆地油气成藏的重要勘探领域。

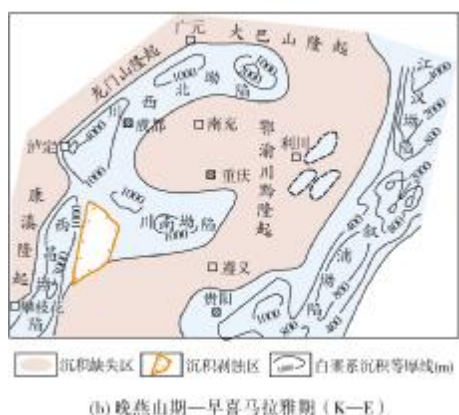
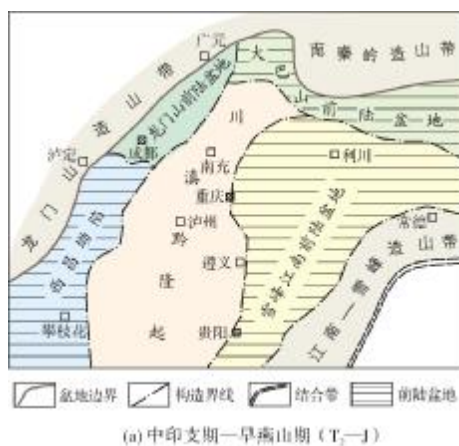


图 15 川渝鄂湘地区构造纲要图

侏罗纪末, 强烈的早燕山期板块挤压构造运动使华莹山深大断裂带以东的江南—雪峰、大巴山—

大洪山前陆盆地反转脱耦, 形成了强烈的早燕山期褶皱断裂, 与 K 层序为缺失不整合。在华莹山深大断裂带以西的龙门山前陆盆地和川中隆起为振荡隆升运动, 为龙门山前陆盆地和川中隆起继承发展的耦合关系, 与 K 层序为连续整合—间断假整合。

中印支期—早燕山期间, 是四川盆地 (含中扬子) 海相油气区域运聚和晚期成藏的重要时期。华莹山深大断裂带以东的扬子前陆盆地地区由于 J 末江南—雪峰、大巴山—大洪山前陆盆地反转脱耦, 形成了强烈的早燕山期褶皱, 成为海相油气晚期成藏的重要时期。华莹山深大断裂带以西的龙门山前陆盆地和川中隆起为振荡隆升运动, 海相油气处于区域运聚时期。

2.1.2 晚燕山期—早喜马拉雅期

晚燕山期—早喜马拉雅期 (K — E) 为前陆盆地区域盖层发育的中期 (图 15b)。期内四川盆地 (含中扬子) 周缘的江南—雪峰、大巴山—大洪山、龙门山等造山带及华莹山深大断裂带以东反转脱耦的江南—雪峰、大巴山—大洪山前陆盆地早—中白垩世 (K_1 — K_2) 强烈抬升剥蚀, T_2 — J 前陆盆地区域盖层被剥蚀残留。晚白垩世—早第三纪 (K_3 — E) 江南—雪峰、大巴山—大洪山、龙门山造山带及江南—雪峰、大巴山—大洪山前陆盆地发生强烈板块拉张构造运动, 形成了 K_3 — E 各类拉张盆地。在华莹山深大断裂带以西的龙门山前陆盆地和川中隆起为振荡隆升运动, 为龙门山前陆盆地和川中隆起继承发展的耦合关系, T_2 — J 前陆盆地区域盖层之上继承性沉积了 K — E 前陆盆地区域盖层, 由大套泥砂岩组成, 厚度 500~3 000 m。

早第三纪末, 早喜马拉雅期断块—隆升板块构造运动使华莹山深大断裂带以西的龙门山前陆盆地和川中隆起反转脱耦, 形成了早喜马拉雅期褶皱, 与 N — Q 层序为不整合。华莹山深大断裂带以东 J 末反转脱耦的 T_2 — J 江南—雪峰、大巴山—大洪山前陆盆地继续抬升剥蚀被改造。

晚燕山期—早喜马拉雅期间, 是四川盆地 (含中扬子) 海陆相油气晚期成藏的重要时期。华莹山深大断裂带以东 T_2 — J 的江南—雪峰、大巴山—大洪山前陆盆地, 由于侏罗纪末反转脱耦的早燕山褶皱油气藏在期内处于不平衡抬升剥蚀改造, 故油气藏处于保存与破坏同步发展阶段。凡有 T_2 — J 前陆

盆地区域盖层分布的地区，油气藏处于保存发展时期。凡没有 T_2-J 前陆盆地区域盖层分布的地区，油气藏处于破坏发展时期。华莹山深大断裂带以西的龙门山前陆盆地和川中隆起，早第三纪末反转脱耦的早喜马拉雅期褶皱，成为晚期油气成藏最有利的圈闭条件，故这些地区处于海陆相油气晚期成藏的发生发展阶段。

2.1.3 晚喜马拉雅期

晚喜马拉雅期(N—Q)为前陆盆地区域盖层发生发展的晚期。期内四川盆地(含中扬子)周缘的江南—雪峰、大巴山—大洪山、龙门山等造山带及华莹山深大断裂带以东的江南—雪峰、大巴山—大洪山 T_2-J 前陆盆地和华莹山深大断裂带以西的龙门

山、川中隆起 T_2-E 前陆盆地在 E 末断块—隆升板块构造运动后受到不平衡抬升剥蚀而被改造。

晚喜马拉雅期也是四川盆地(含中扬子)海陆相油气晚期成藏继续发生发展的时期。华莹山深大断裂带以东和以西地区，凡有 T_2-J 和 T_2-E 前陆盆地区域盖层分布的地区，为早燕山期和早喜马拉雅期褶皱油气藏处于保存发展时期。凡是没有 T_2-J 和 T_2-E 前陆盆地区域盖层分布的地区，为早燕山期和早喜马拉雅期油气藏的破坏发展时期。

2.2 四川盆地及其周缘的构造保存单元

根据四川盆地天然气勘探开发的成果，以前陆盆地残留程度为主要依据，将四川盆地及其周缘构造保存单元划分为三大类五个组合区(表 1, 图 16)。

表 1 构造保存单元组合区划表

组合区分类	组合区名称	分布范围
I 类：整体封存构造保存单元组合区	川渝整体封存构造保存单元组合区	1. 平缓构造带 2. 川北拗陷平缓构造带 3. 川西拗陷低陡构造带
II 类：整体封存间夹残留构造保存单元组合区	鄂渝川整体封存间夹残留构造保存单元组合区	鄂西—川东隔档式断褶高陡构造带(中西部)
III 类*：缺乏封存构造保存单元组合区	湘鄂西缺乏封存构造保存单元组合区	1. 江南—雪峰基底拆离逆冲推覆高陡构造带 2. 湘鄂西隔档式断褶高陡构造带 3. 鄂西—渝东隔档式断褶高陡构造带(东部)
	川陕缺乏封存构造保存单元组合区	1. 大巴山基底拆离逆冲推覆高陡构造带 2. 大巴山断褶高陡构造带
	川西北缺乏封存构造保存单元组合区	1. 龙门山基底拆离逆冲推覆高陡构造带 2. 龙门山逆冲推覆高陡构造带

* III 类又分为两个亚类, III₁ 亚类为残留 T_1-S 组合区, III₂ 亚类为剥蚀 S 组合区。

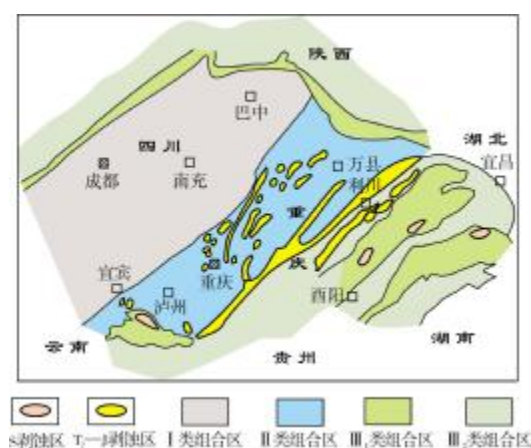


图 16 川渝鄂湘地区油气保存单元评价图

I 类组合区：整体封存构造保存单元组合区；II 类组合区：整体封存间夹残留构造保存单元组合区；III 类组合区：缺乏封存构造保存单元组合区，其中：III₁ 亚类为残留 T_1-S 组合区，III₂ 亚类为剥蚀 S 组合区

2.2.1 构造保存条件的划分

I 整体封存构造保存单元 保存有 T_2-J 同造山前陆盆地或其上继承叠加有 K—E 后造山前陆盆地构造带。为天然气藏封堵系统分布区，圈闭钻探成功率最高。

II 残留封存构造保存单元 局部残留有 T_2-J 同造山前陆盆地，大部地区剥露 T_1-S 海相原型盆地构造带。为天然气藏局部封堵系统分布区，大部地区为天然气藏散失系统，圈闭钻探成功率很低。

III 缺乏封存构造保存单元 缺乏 T_2-J 同造山前陆盆地，剥露 O—Z 海相原型盆地构造带。为天然气藏散失系统分布区，缺乏圈闭钻探条件。

2.2.2 构造保存单元的组区划

I 类组合区 区内有一个，即川渝整体封存构造保存单元组合区，包括川中隆起平缓构造带、川

北坳陷平缓构造带、川西坳陷低陡构造带三个构造区带。三个区带均为 T_2 —J 同造山前陆盆地或其上继承叠加有 K—E 后造山前陆盆地整体覆盖,均为水动力停滞环境,各类有效封堵面良好,为天然气藏封堵系统区域分布区。区内具备有效储产层的圈闭,一般都能获得气藏,包括 J_2 — J_3 次生气藏,圈闭钻探成功率高,为四川盆地天然气勘探的主战场。

II 类组合区 区内有一个,即鄂渝川整体封存间夹残留构造保存单元组合区,分布于鄂西—川东隔档式断褶高陡构造带(中西部)。区内为鄂西—川东隔档式断褶高陡构造带的重要组成部分,高陡背斜构造带与低缓向斜构造带相间分布。其中,除高陡背斜构造带主体背斜构造缺乏 T_2 —J 同造山前陆盆地覆盖、水动力停滞环境及各类有效封堵面遭受破坏外,其余构造在 T_2 —J 同造山前陆盆地覆盖、水动力停滞环境及各类有效封堵面条件方面均为良好,为天然气藏封堵系统区域分布区。区内具备有效储产层的圈闭,一般都能获得中高产气藏,特别是高陡背斜构造带两翼断下盘的潜伏背斜构造圈闭往往能获得高产气藏,故与川渝整体封存构造保存单元组合区具有相似的气藏保存条件和相似的钻探效果,亦为四川盆地天然气勘探的重要战场。

III 类组合区 区内有湘鄂西、川陕、川西北三个缺乏封存构造保存单元组合区,包括七个构造带。主要分布于四川盆地外围,缺乏 T_2 —J 同造山前陆盆地覆盖、缺乏水动力停滞环境,各类有效封堵面遭受严重破坏,为天然气藏散失系统区域分布区,大量探井钻探结果仅发现气藏散失破坏后的残存气,为高风险勘探地区。

3 中浅层穿越流——破坏气藏的封堵条件

鄂西—川东隔档式断褶高陡构造带中西部位于鄂渝川联结地区,为高陡背斜构造带与低缓向斜构造带相间地区。低缓向斜构造带为天然气藏封堵系统分布区,是天然气藏勘探的有利区块。高陡背斜构造带为天然气藏散失系统分布区,也是天然气藏勘探的高风险区块。而在高陡背斜构造带间的低缓向斜构造带形成的中浅层穿越流破坏了中浅层天然气藏的封堵条件,致使一批中浅层圈闭失效。而穿越流对中深层天然气藏的封堵条件影响不大,一批中深层圈闭继续有效。

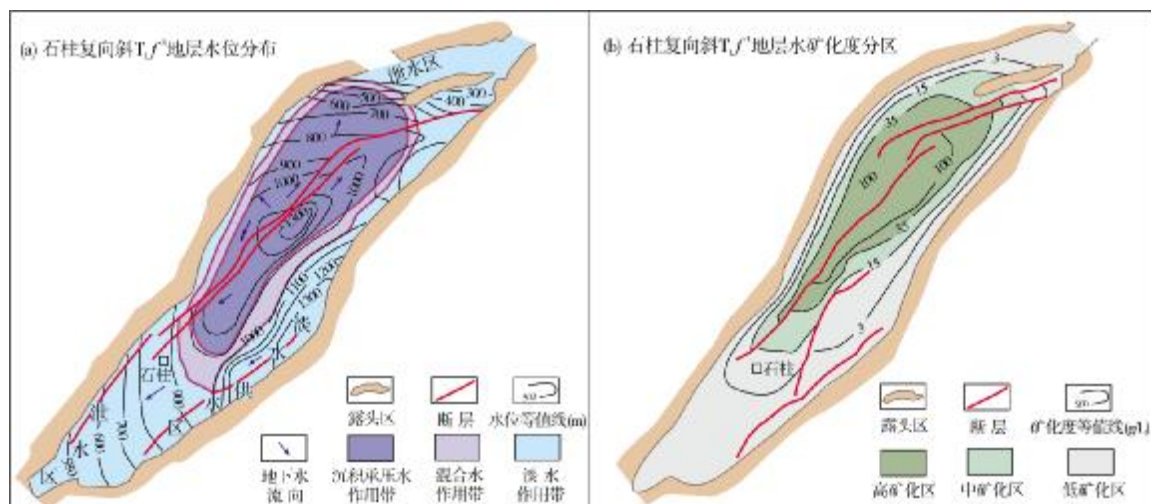
3.1 穿越流的形成和影响

以石柱复向斜构造带为例^②:

石柱复向斜构造带位于鄂渝边界的齐岳山与方斗山高陡背斜构造带间,为 T_2 —J 同造山前陆盆地整体覆盖的整体封存构造单元,地表断裂不发育,为承压水区,水动力停滞带环境。其东西两侧的齐岳山、方斗山高陡背斜构造带,主体部位剥露 T_1 — P_1 海相碳酸盐岩,岩溶、断裂发育,为供水区,水动力自由交替带环境。泄水区位于石柱复向斜构造带南北端的乌江流域和长江流域。从而形成了下三叠统嘉陵江组五段和飞仙关组三段中浅层穿越流。

嘉陵江组五段(T_1j^5)穿越流的影响 T_1j^5 为四川盆地的工业气层之一,在整体封存构造保存单元组合区(I类)的很多圈闭上有天然气藏。川东卧龙河气田由于断层切割,纵向组成统一水动力系统的嘉陵江组五²段—五¹段—四³段的气藏,获得探明储量 $143.41 \times 10^8 m^3$,为气田主力气藏之一。而在整体封存间夹残留构造保存单元组合区(II类)的很多圈闭上存在有外来水介入的穿越流,这在石柱复向斜构造带(由溶孔鲕粒灰岩、鲕粒白云岩组成)内普遍存在。位于石柱复向斜腹部的建南气田, T_1j^5 地层水矿化度仅 $4200 mg/L$,属 Na_2SO_4 型,压力系数低于 1。复向斜西缘马鞍槽圈闭的马鞍 1 井,在井深 2475.6~2597.4 m 段钻遇 T_1j^5 低压淡水层。从而表明在该区内不存在类似于卧龙河气田的有效圈闭和气藏。

飞仙关组三段(T_1f^3)穿越流的影响 T_1f^3 为四川盆地的主力气层之一,无论在整体封存构造保存单元组合区(I类)还是在整体封存间夹残留构造保存单元组合区(II类)的很多圈闭上均为天然气藏,为川东北地区的主力气层,亦为石柱复向斜构造带建南气田的主力气层。而在石柱复向斜南部,由于穿越流的存在,所有钻探圈闭均为低矿化度地层水。 T_1f^3 水位等值线(图 17a)和矿化度分区(图 17b)显示:方斗山中段和齐岳山中南段为淡水供水区,其南北端的乌江流域和长江流域为泄水区。复向斜构造带内自西而东分布有沉积承压水作用带(高矿化度区)、混合水作用带(中等矿化度区)和淡水作用带(低矿化度区)。其中以淡水作用带的分布范围最广,包括复向斜东部和南部,加之 T_1f^3 岩性为大面积分布溶孔型滩坝颗粒岩(厚度可达 70~100 m),从而在石柱复向斜南部形成穿越流,造成区内所有 T_1f^3 圈闭钻探失利。

图 17 鄂西—渝东地区石柱复向斜飞仙关组三段 (T_1f^3) 水位等值线和矿化度分布图

3.2 实例剖析

实例 1——盐井构造 (图 18a) 位于石柱复向斜南部东侧边缘, 地表层位为自流井组 (J_1z), 盐 1 井 T_1f^3 段 (井深 2 109~2 160.4 m) 射孔测试, 自溢水产量为 $12.4 \text{ m}^3/\text{d}$, 总矿化度为 $2\,194 \text{ mg/L}$, Cl^- 含量为 93.1 mg/L , 属 NaHCO_3 水型。

实例 2——茶园坪构造 (图 18b) 位于石柱复向斜南部的腹部, 地表层位为沙溪庙组 (J_2s), 茶园 1 井 T_1f^3 段 (井深 2 466.91~2 551.964 m) 测试产水 $230.4 \text{ m}^3/\text{d}$, 总矿化度 $2\,948.61\sim3\,067.45 \text{ mg/L}$, Na_2SO_4 水型, 压力系数 1.06。

实例 3——青岗坪构造 (图 18c) 位于石柱复向斜南部的腹部, 建南气田东南延伸端, 地表层位为沙溪庙组 (J_2s), 建 69 井 T_1f^3 段 (井深 3 661.65~4 052.51 m, 水平侧钻段) 历经 164 天氧化解堵、注氮抽排诱喷和酸化两个阶段测试, 地层总产出水量 $21\,935 \text{ m}^3$, Cl^- 含量为 $6\,614\sim6\,788 \text{ mg/L}$, NaHCO_3 水型。

实例 4——卷店断鼻构造 位于石柱复向斜东南部边缘, 邻近齐岳山高陡背斜带西斜坡, 地表层位上侏罗统 (J_3), 卷 1 井 (井位参见图 18a) T_1j^{2-4} 段 (井深 2 223.61~2 417.28 m) 测试, 产水 $43.2 \text{ m}^3/\text{d}$, 总矿化度为 $1\,433 \text{ mg/L}$, Cl^- 含量 $66\sim82 \text{ mg/L}$, 属 Na_2SO_4 水型。 P_2l-P_2c 段 (井深 2 675.41~2 902.00 m) 测试, 产水 $144 \text{ m}^3/\text{d}$, 总矿化度为 $2\,471 \text{ mg/L}$, Cl^- 含量 853 mg/L , 属 Na_2SO_4 水型。 P_2c 段 (井深 3 191.77~3 303.57 m) 测试,

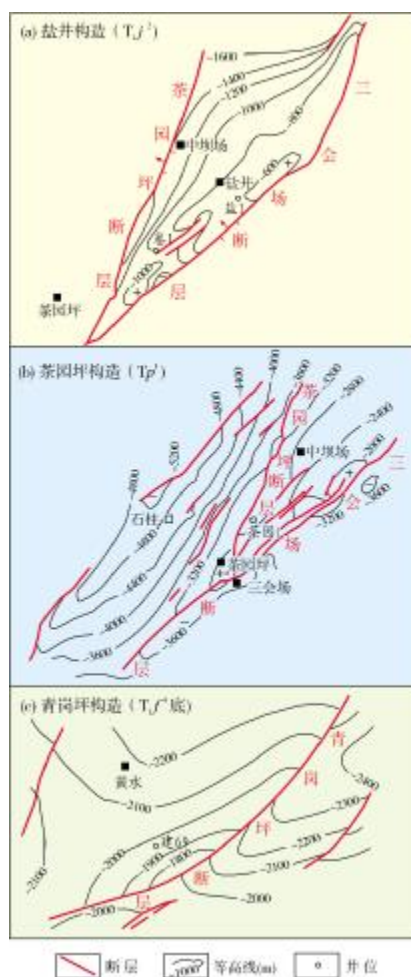


图 18 鄂西—渝东地区石柱复向斜盐井构造、茶园坪构造、青岗坪构造地震反射层构造图

产水 9.6 m³/d, 总矿化度为 26 026 mg/L, Cl⁻含量 637 mg/L, 属 Na₂SO₄ 水型。

经以上剖析可知, 石柱复向斜南部众多中浅层圈闭的钻探失利, 主要是存在以石柱复向斜东部齐岳山高陡背斜带为供水、复向斜西南部乌江流域为泄水、复向斜南部为穿越区的穿越流。以卷 1 井飞仙关组 (T₁f) 水动力条件为例: 该井位于齐岳山西翼盐井构造西南部的卷店断坡上 (图 18a), 其间虽有断凹与齐岳山相隔, 但由于坡度大、断层发育, 形成一个相连的冲刷斜坡, 在地腹形成穿越流, 严重破坏了二叠系和三叠系的保存条件。T₁f 在齐岳山出露高度为海拔 1 500 m, 但卷 1 井 T₁f⁴ 底的海拔为 -1 260.52 m, 二者地面相距 7.5 km, 计算静水柱压力约为 276.05 kg/cm²; 而卷 1 井中途测试, T₁f³ 关井压力为 31 kg/cm², 加液柱压力 (T₁f³ 顶 2 242.5 m) 为 224.25 kg/cm², 静水柱压力为 255.25 kg/cm²。两地的静水柱压力相差 20.80 kg/cm², 可见水压头有很大损失。根据静水压力、水性、及产液性质综合分析, 卷 1 井井下与齐岳山地表相通形成穿越流, 且沿卷店断裂带下渗, 从而造成了水压头的损失, 钻遇的二叠系和三叠系均为低矿化度 Na₂SO₄ 水型的产水层, 成为开启水型, 导致卷 1 井钻探失利。

4 断层——影响气藏的散失或封堵条件

在四川盆地的天然气勘探中, 一些有继承性前陆盆地保存和具备水动力停滞环境条件但发育有通天断层、潜伏通天断层或延伸上端与地表岩溶淡水层下延部位相交的潜伏断层的一些圈闭, 勘探屡屡失利。

断层是影响天然气藏散失或封堵的主要因素, 不管其性质是通天断层, 潜伏通天断层, 还是其延伸上端与地表岩溶淡水层下延部位相交的潜伏断层, 均可形成局部天然气藏逸散系统, 破坏圈闭的有效性。断层与气藏构造的交点为气水溢出口, 即近似的气水界面, 断层切割构造部位越高, 破坏性越大^②。

实例 1——茨竹垭构造 (图 19)

茨竹垭构造是位于石柱复向斜西北翼边部、方斗山高陡背斜带大山坪高陡背斜东南翼的一个潜伏圈闭, 为石柱复向斜整体封存构造保存单元组合区

和水动力停滞带的重要组成部分。地面出露 J₁ 地层, T₂—J₁ 同造山前陆盆地地层厚度达 1 500 m。P₁ 底地震构造由东、西两个高点组成, 圈闭面积为 19.52 km², 闭合度 540 m, 最底圈闭线位于 -4 800 m, 最高点海拔 -4 260 m。钻前, 勘探家和学者都看好这个构造的石炭系。1996 年 1 月 8 日—1997 年 6 月 22 日, 四川石油管理局在大山坪高陡背斜东南翼钻探了定向斜井茨 (竹) 1 井, 完钻井深 5 625 m, 完钻层位为志留系。石炭系钻厚达 52.5 m, 为溶蚀孔洞白云岩储层, 孔隙度 1.98%~7.69% (平均 4.6%), 含水饱和度 17.36%~91.01%。井深 5 625~5 546.3 m 井段地层测试和井深 5 548.72~5 543.52 m 井段射孔测试结果: 水产量为 17.18~18.17 m³/d 和 8.38 m³/d, 属 CaCl₂ 水型, Cl⁻含量为 77 146 mg/L; 天然气产量在 5.7~10.7 m³/d; 压力系数为 1.061; 结论为中偏低渗透水层, 含微气。经分析, 茨竹 1 井石炭系钻探失利的主要原因为断层。



图 19 鄂西—渝东地区石柱复向斜茨竹垭构造
91-D3 测线地震地质剖面

T₁f 下三叠统飞仙关组; T₁j 下三叠统嘉陵江组;

T₂l 中三叠统雷口坡组; T₃x 上三叠统须家河组。

F₁ 茨竹垭断层; F₇ 茨西断层; F₈ 茨东断层; F₉ 血口场断层

茨竹 1 井开孔井位位于大山坪高陡背斜轴部偏东南翼陡翼 T₁j³ 地层中, 地面、地下均断层发育 (图 19)。其中大山坪构造分布有 F₁、F₂、F₃、F₄、F₅、F₆ 六条断层, 茨竹垭构造分布有茨西 (F₇)、茨东 (F₈) 两条断层, 均为逆冲—逆掩断层。茨竹 1 井井下钻遇 F₁、F₂、F₃ 三条逆冲断层和一个倒转断层, 其上延终端为 T₁j⁵—T₃x, 均穿越了表层—中层的 T₁j 岩溶发育带, 井内发生了特大的放空和漏失, F₁ 断层 (地面茨竹垭断层) 位于井口东侧 100 多米。位于茨竹垭构造西翼的 F₇ 断层上延终端被大山坪构造 F₃ 断层所截, 从而形成了由茨竹

坳构造 F_7 潜伏断层、大山坪构造 F_3 断层、 T_1j 石膏层岩溶发育带、大山坪地表露头组成的天然气逸散系统。 F_7 潜伏断层切过的石炭系 (C) 顶构造的最高部位为气水的最高溢出点, 近似的气水界面海拔为 $-4\ 370\text{ m}$, 茨竹 1 井钻达 C 顶构造海拔为 $-4\ 440.88\text{ m}$, 低于近似的气水界面 70.88 m , 从而造成了茨竹 1 井钻探的失利。但茨竹坳构造 C 顶构造最高点海拔为 $-4\ 260\text{ m}$, 高于气水的最高溢出点 (即近似的气水界面 $-4\ 370\text{ m}$) 110 m , 可能存在残存的气顶, 充满度为 20.37% 。故茨竹 1 井钻探的失利, 不等于茨竹坳构造的失利, 在对可能残存气顶进行资源和经济评估后, 仍可决定是否对其进行继续勘探。

实例 2——马鞍槽构造 (图 20)

马鞍槽构造是位于石柱复向斜西翼边部、方斗山高陡背斜带东南翼的一个潜伏圈闭, 为石柱复向斜整体封存构造保存单元组合区和水动力停滞带的重要组成部分。地面出露 J_1 地层, $T_2—J_1$ 同造山前陆盆地地层厚度达 $2\ 150\text{ m}$ 。 P_1 底地震构造圈闭面积为 18.4 km^2 , 闭合度达 310 m , 最底圈闭线位于 $-4\ 000\text{ m}$, 最高点海拔为 $-3\ 690\text{ m}$ 。钻前, 勘探家和学者也都看好这个构造的石炭系。1997 年 4 月 7 日—1998 年 5 月 17 日, 在该构造上钻探了马 (鞍) 1 井, 完钻井深 $4\ 639.3\text{ m}$, 完钻层位为 S。石炭系钻厚 43 m , 为溶蚀孔洞白云岩储层, 平均孔隙度 4.04% 。经对井深 $4\ 571.43\sim 4\ 572.19\text{ m}$ 井段地层测试, 水产量为 $35.66\text{ m}^3/\text{d}$, 属 CaCl_2 水型, 总矿化度 $134\ 000\text{ mg/L}$; 压力系数为 1.034 ; 结论为常压水层。经分析, 马鞍 1 井石炭系钻探失利的主要原因也为断层。

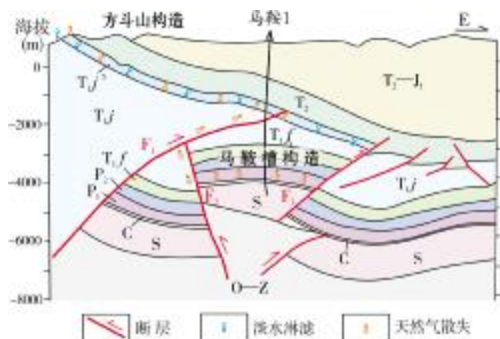


图 20 鄂西—渝东地区石柱复向斜马鞍槽构造 94SZ-16 测线地震地质解释剖面

F_1 方东断层; F_2 马西断层; F_3 马东断层

马鞍 1 井开孔于马鞍槽构造高点西北部轴部, 地面断层不发育, 地下断层较发育, 分布有方东断层 (F_1)、马西断层 (F_2) 和马东断层组 (F_3), 均为逆冲断层。位于马鞍槽构造西翼的 F_2 断层, 切穿 P_1 底地震构造圈闭的最高部位海拔约为 $-3\ 870\text{ m}$, 其上延终端为 F_1 方东断层所截。而 F_1 断层上延终端通过马鞍 1 井的是嘉陵江组五段 (T_{1j}^5 , 井深 $2\ 524\text{ m}$), 断层附近井深 $2\ 475.5\sim 2\ 597.4\text{ m}$, 录井显示为一低压淡水层, 其往西与方斗山高陡背斜带地面嘉陵江组露头相连, 从而形成了由马鞍槽构造的 F_2 马西潜伏断层、方斗山高陡背斜带 F_1 断层、嘉陵江组五段的低压淡水层、方斗山高陡背斜带的地表嘉陵江组碳酸岩岩溶露头所组成的天然气逸散系统。 F_2 潜伏断层切过石炭系顶构造的最高部位为气水的最高溢出点, 近似的气水界面海拔为 $-3\ 870\text{ m}$; 马鞍 1 井钻达石炭系顶构造的海拔为 $-3\ 844.5\text{ m}$, 位于该近似气水界面的附近, 从而造成了马鞍 1 井钻探的失利。但马鞍槽构造石炭系顶构造最高点海拔为 $-3\ 690\text{ m}$, 高于气水的最高溢出点 (即近似的气水界面 $-3\ 870\text{ m}$) 180 m , 可能存在残存的气顶, 充满度为 58.06% 。对马鞍槽构造是否继续进行勘探, 还需作进一步的资源和经济评估。

类似于茨竹坳构造、马鞍槽构造的天然气逸散系统, 在四川盆地周缘以及高陡背斜带两侧到处可见, 断层切割气藏构造的部位越高, 破坏性就越大, 这应当在勘探中引起高度重视。

5 认识和建议

通过四川盆地天然气藏的破坏与保存条件剖析表明, 在四川盆地及我国南方海相天然气勘探中应当高度重视天然气藏的破坏与保存条件的研究, 以利于天然气藏勘探区块、目标的选择和勘探效率的提高。

(1) 充分应用四川盆地天然气藏破坏与保存条件的勘探研究成果, 促进勘探效率的提高 在深化勘探中, 川渝整体封存构造保存单元组合区的川中隆起平缓构造带、川北坳陷平缓构造带、川西坳陷低陡构造带和鄂渝川整体封存间夹残留构造保存单元组合区中整体封存的向斜构造带, 应对石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系等已获气层加强勘探, 以获得更多的气藏, 扩大探明储量。盆地边缘和邻近高陡背斜构造带的构造, 应考虑浅层穿越流

和断层对天然气藏破坏的影响,以防勘探的失利。对深埋地腹保存条件十分良好的下古生界天然气藏的勘探和评价则应考虑加里东期古水动力条件和深部圈闭规模对气水分异等成藏条件的影响。

(2) 天然气藏的破坏与保存条件是我国南方海相天然气成藏中的主要问题,应作为勘探评价的主题进行研究。对四川盆地及我国南方海相天然气晚期成藏中良好的生储运聚保条件是毋庸置疑的,但我国南方广阔的海相油气勘探领域中除四川盆地外尚没有新的突破,其主要原因就是天然气藏的晚期破坏与保存条件问题。为此,应以天然气藏的封堵系统和散失系统这两个理念为主要内容,把我国南方海相天然气藏的破坏与保存条件作为勘探评价的主题进行研究,以利于我国南方海相天然气藏保存区块的深化选择。在研究中要特别注意海相碳酸盐岩剥露区的岩溶、断层、穿越流对天然气藏的破坏与保存条件的影响(尤其是对下古生界天然气藏的

影响),以及中三叠统一侏罗系前陆盆地区的断层和热液对天然气藏的破坏与保存条件的影响。

(3) 应用反向思维,深化四川盆地及我国南方海相天然气藏破坏与保存条件的研究评价。在四川盆地及我国南方海相天然气藏的勘探中,已经积累了大量天然气藏保存条件遭受破坏的资料,特别是试井资料和水文地质、水动力资料,它是天然气藏破坏与保存条件研究评价的核心资料。我们应当应用反向思维,利用宏观和微观相结合的方法,系统深化四川盆地及我国南方海相天然气藏破坏与保存条件的研究评价,从而抛弃海相天然气藏遭受破坏严重的地区,筛选天然气藏保存有利的地区,提高勘探成效。

参考文献

- [1] 张继明,唐泽尧,王丽霜. 中国石油地质志:卷十 四川油气区 [M]. 北京:石油工业出版社, 1989.

编辑:赵国宪

Analysis of Wreck and Preservation Conditions of Natural Gas Reservoirs in Sichuan Basin

Yao Xuegen

Abstract: Either success or failure of natural gas exploration depends on enclosed system or escaped system of the gas reservoir trap. Whether the enclosed system of a trap is good or poor lies on available enclosed surface of the trap and the effective sealing condition of the whole overlying regional cap rock with the circumstance condition of regional hydrodynamic stagnation zone. Available traps with good enclosed surfaces mean high rate of successful exploration. An escaped system of a gas reservoir trap includes denuded area without effective sealing condition of regional cap rock, the circumstance condition of regional hydrodynamic free alternation zone, and obvious and/or hidden faults extending to the surface. An escaped system will lead to an invalid gas trap, which means failure of exploration. By case analysis of wreck and preservation conditions of gas reservoirs in Sichuan Basin, it is suggested that an attention should be paid to the studies of wreck and preservation conditions of gas reservoirs in natural gas exploration in Sichuan Basin and southern China to achieve exactly choice aims of exploration and rise exploration efficiency.

Key words: Natural gas exploration; Enclosed system of gas reservoir; Escaped system of gas reservoir; Preservation conditions of gas reservoir; Sichuan Basin

Yao Xuegen: male, Senior Geologist. Add: Zhejiang Oilfield Company, PetroChina, Liuxia, Hangzhou, 310023 China