

鄂西渝东区志留系流体封存箱的演化与天然气成藏

胡晓凤, 丁青

(中国石化江汉油田分公司勘探开发研究院)

摘 要 因鄂西渝东区志留系勘探程度甚低, 长期以来志留系一直被视为烃源层或盖层。随着建深1井在志留系钻获高压工业气流, 曾经的“思维定式”发生了改变。通过对志留系油气成藏条件及碳、氧、锶稳定同位素追踪流体行为轨迹的分析认为, 该区志留系具有自源供烃的特点以及流体相对封闭的独特性, 这是形成志留系下统龙马溪组、小河坝组以及志留系中统韩家店组自生自储自盖式高压流体封存箱的主要因素。而志留系封存箱在早燕山期以前的构造、早燕山中—晚期的改造、晚燕山—喜马拉雅期的定型与发展, 控制了志留系天然气的成藏过程。

关键词 鄂西渝东地区; 志留系; 流体封存箱; 同位素地球化学; 天然气成藏

中图分类号: TE112.31

文献标识码: A

封存箱的概念源于20世纪70年代Barker等人^[1]对沉积盆地中压力结构的研究, 他发现大多数盆地存在双层和多层压力带, 而这些相对独立的压力系统都是被某类地质体分隔开的。Powley^[2]最早(1990年)使用流体封存箱(fluid compartment)这一术语, 并把流体封存箱划分为三种类型: 异常高压封存箱、常压封存箱和异常低压封存箱。这一概念的提出引起了石油学界的广泛关注。勘探实践表明封存箱理论是一种重要的成藏研究方法, 国内一批学者运用该理论对许多盆地的油气分布进行了研究, 如四川盆地^[3]、塔里木盆地^[4]、准噶尔盆地^[5]、鄂尔多斯盆地^[6]等。

鄂西渝东区志留系是一个十分独特的层系。它是在扬子陆块稳定的以碳酸盐岩为主体的台地区广泛发育的一套厚度巨大的碎屑岩系, 具有自生、自储、自盖且志留系下、中统各组层层含气的特点, 尤其是志留系中统韩家店组封存箱内形成的高压气藏具有自源的烃源岩、多裂缝的内部岩体和低渗透的周围封隔层等诸多成藏优势。因此, 深刻认识该区志留系封存箱对天然气的控制作用不仅有着重要的理论意义, 也有着积极的实践意义。

1 流体封存箱的构成与划分

鄂西渝东区志留纪经历了多个次级构造沉积旋回, 形成了多套连续沉积的盖层, 造就了多个子封存箱。以钻探于建南构造的建深1井为例分析, 建深1井于志留系下统龙马溪组、小河坝组以及志留系中统韩家店组层层产气, 其中韩家店组获得日产 $5.13 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的高压工业气流^[7]。韩家店组的顶部和龙马溪组的底部均发育泥质岩, 厚度分别为64.80 m和39.10 m, 构成志留系封存箱的顶、底板(图1、表1), 侧板为太平镇断层。由于志留系下统小河坝组的上部、龙马溪组的中上部也发育较厚的泥质岩, 厚度分别为219.76 m和349.50 m, 致使志留系封存箱内部流体压力、烃含量等在纵向上呈现明显的分带特征^[8](图1、表1)。因此, 依据志留系中流体的分布以及封存箱顶、底板的分布规律, 将志留系流体封存箱划分为三个子箱, 即上部(韩家店组)、中部(小河坝组)和下部(龙马溪组)封存箱。

1.1 烃源岩

志留系烃源岩是一套广海陆棚相的砂泥岩沉

收稿日期: 2010-11-04; 改回日期: 2011-06-17

基金项目: 本文为国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”下属专题“中扬子地区海相层系成藏条件与勘探评价”(项目编号: 2008ZX05005-003-004)部分成果

胡晓凤: 女, 1963生, 高级工程师。主要从事油气保存条件研究。通讯地址: 433124 湖北省潜江广华

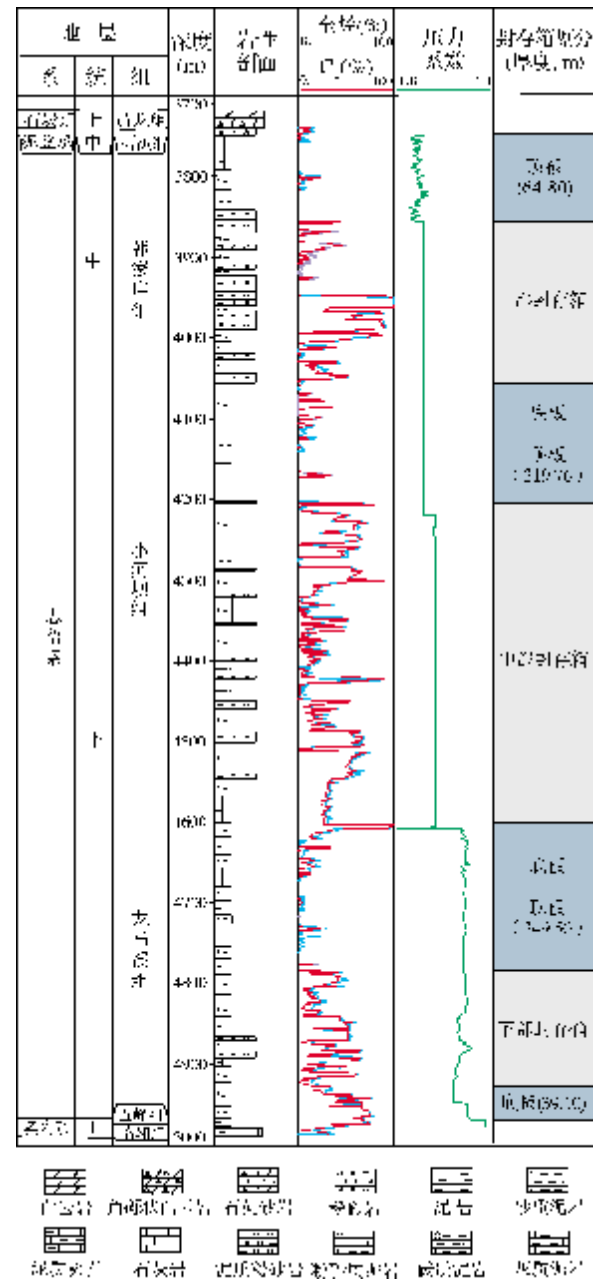


图 1 鄂西渝东区建深 1 井志留系流体封存箱划分图

积,以碳质页岩、深灰色泥页岩为主,主要发育于下志留统龙马溪组底部、小河坝组中上部以及韩家店组上部。志留系中统韩家店组有效烃源岩厚 58.0m,有机碳含量在 0.52%~4.55%之间,平均值达 1.62%,氯仿沥青“A”平均值为 0.0496%;小河坝组有效烃源岩厚 108.0m,有机碳含量在 0.54%~2.26%之间,平均值达 0.82%,氯仿沥青“A”平均值为 0.0394%,均属好—优质烃源岩。龙马溪组有效烃源岩厚 137.59m,有机碳含量在 0.86%~7.81%之间,平均值达 2.23%,氯仿沥青“A”为 0.018%,属优质烃源岩。因此,志留系烃源岩不仅厚度大,而且有机质丰度高,为志留系气藏提供了充足的气源条件。

1.2 储集岩

志留系储集岩主要分布于中统韩家店组的中、下部以及下统小河坝组的中上部和龙马溪组的中部,岩性以极细砂岩和粉砂岩为主,属于特低孔隙度、特低渗透率储层。韩家店组储层相对发育,砂岩累厚达 100m,其中粉砂、细砂岩厚 42.5m,泥质粉砂岩厚 57.5m,单层厚在 1.0~7.5m 范围,岩心实测孔隙度在 0.40%~2.90%之间,平均 1.80%;渗透率为 $(0.006\sim18.200)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均为 $1.50\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。其次是小河坝组储层,砂岩累厚 60.0m,其中粉砂岩 20.0m,泥质粉砂岩 40.0m,单层厚度在 2.0~9.0m 之间;岩心实测孔隙度在 0.14%~1.69%之间,平均值为 0.92%;渗透率在 $(0.006\sim14.300)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间,平均值为 $0.725\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。龙马溪组储层砂岩累厚 23.4m,单层厚在 0.7~3.0m 范围,因无满足物性测试的岩样,应用测井资料预测,孔隙度介于 1.1%~3.8%之间。

1.3 顶板(盖层)、底板及侧板

作为顶板的小河坝组中上部泥页岩和韩家店组

表 1 鄂西渝东区建深 1 井志留系流体封存箱内外流体变化一览表

地层划分			封存箱划分	顶、底板岩性	压力系数	全烃含量 (%)	甲烷含量 (%)
系	统	组					
志留系	中统	韩家店组	顶板	以泥岩为主,其次为含砂泥岩、粉砂质泥岩	1.25	0.12	0.08
			上部封存箱(韩家店组)		1.74	44.17	36.82
	下统	小河坝组	底板/顶板	以含砂泥岩与砂质泥岩互层为主,其次为泥岩	1.68	7.72	6.11
			中部封存箱(小河坝组)		1.63	11.38	54.06
		龙马溪组	底板/顶板	泥岩与砂质泥岩互层	1.72	0.08	0.03
			下部封存箱(龙马溪组)		2.06	4.20	8.28
			底板	以碳质泥岩为主,其次为含砂泥岩、粉砂质泥岩	2.02	0.13	0.06

上部泥质岩非常发育,对减缓封存箱内天然气的散失十分有利。从建南构造及周缘已钻达志留系的建深1、三星1、鱼1、利1、太15井等井以及地表石柱冷水溪、石柱双流坝、武隆黄草场、秀山溶溪等剖面

分析(图2,表2),盖层岩类以泥页岩为主,其次为粉砂质泥岩,盖层厚度600~1200m(太15井厚度高达1266.5m)。均质程度均大于55%,最高可达92.2%,属均质盖层。

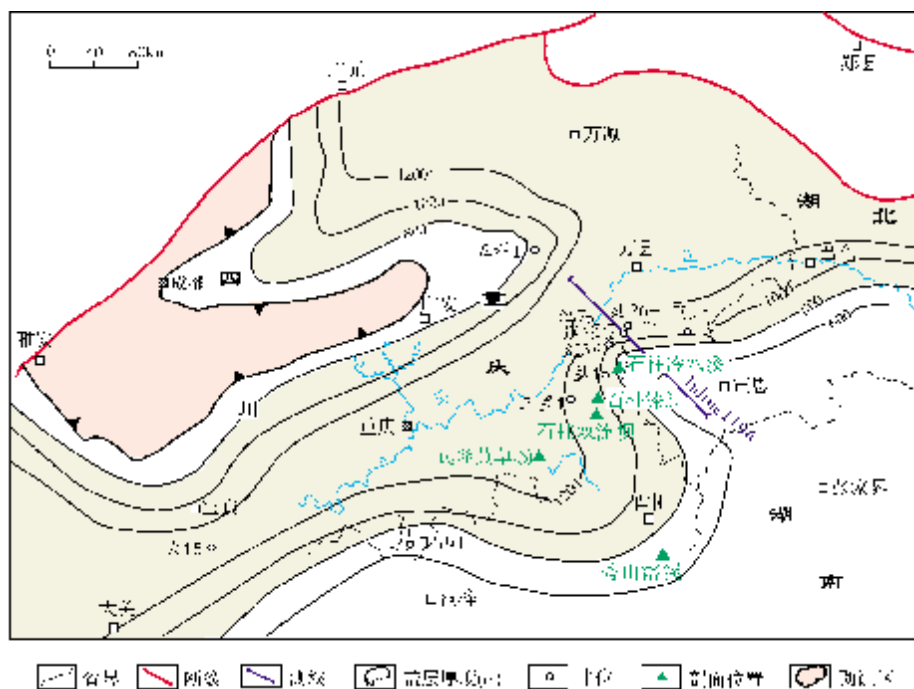


图2 建南及周缘地区志留系盖层厚度等值线图

表2 建南构造及周缘志留系盖层岩类厚度统计

盖层岩类	钻 井(m)								地表剖面(m)			
	太15	丁山1	鱼1	建深1	建26-1	池7	五科1	三星1	秀山溶溪	武隆黄草场	石柱双流坝	石柱冷水溪
粉砂质泥岩	195.0		233.0	69.0	39.6	3.0		3.0	216.3	267.5	632.9	309.1
含砂泥岩				357.0			26.0			143.4		5.1
砂质泥岩			314.0	301.9	74.6	24.0	34.5	83.2	13.3			
碳质泥岩		39.0		17.0	24.0				20.7			
硅质泥岩					6.0							
灰质泥岩		85.0										7.5
泥 岩	793.5	322.0	459.0	291.2	866.7	239.0	139.5	774.1		380.2	250.9	400.2
石膏质泥岩						0.5						
碳质泥页岩												35.5
页 岩		4.0	40.0			889.0	510.0		156.1	189.7	36.2	
砂质页岩			26.0			23.5	95.0		294.4	36.0	128.5	
碳质页岩	276.0					23.5				128.0	32.0	
硅质页岩							2.5					
泥质灰岩		14.0				1.5						
泥灰岩		161.0	1.0				2.5					
泥质条带灰岩	2.0											
合 计	1266.5	625.0	1073.0	1036.1	1011.0	1204.0	810.0	860.3	700.8	1144.7	1080.5	757.3

从盐1井、石柱漆辽剖面、武隆黄草场剖面志留系盖层微孔结构来看,从武隆黄草场至建南构造方向的石柱漆辽以及从盐1井区至建南构造方向的石柱漆辽,微孔优势均具有由弱到强的变化规律(图3a)。石柱漆辽剖面、盐1井、武隆黄草场剖

面微毛细管压力曲线由陡到缓(图3b),突破压力分别为5.55 MPa、3.70 MPa和1.60 MPa,微孔隙分别集中在1.0~16.0 nm、1.0~25.0 nm和1.0~40.0 nm。由此推测建南构造及周缘深埋地腹的志留系盖层具有更强的封闭能力。

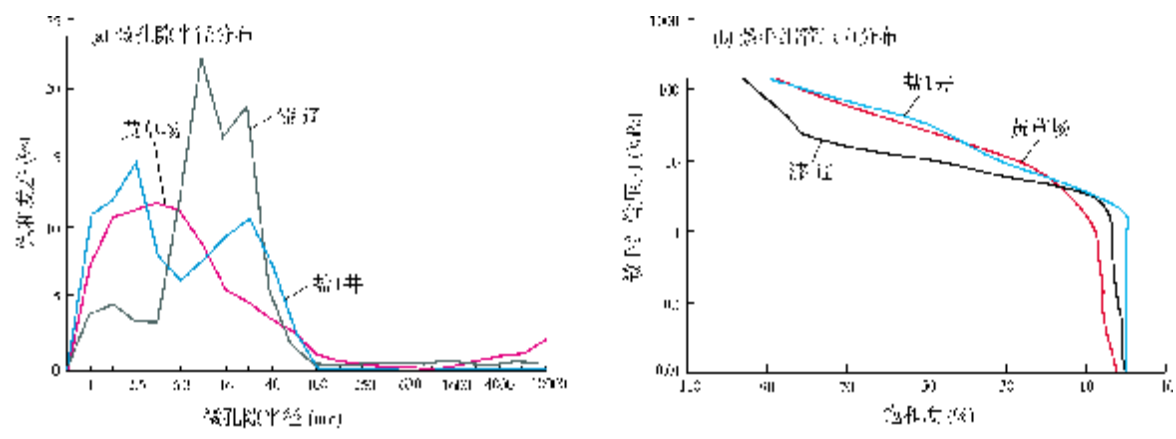


图3 建南构造及周缘志留系盖层封闭能力推断图

关于侧板,以建南构造为例,建南太平镇断层是控制建南构造的主断层(图4),也是该构造形成封存箱的主要侧板。建南构造位于鄂西渝东区石柱复向斜中部,从断层两侧储层并置关系分析,断层上盘志留系韩家店组、小河坝组中的含砂层对置泥质非

渗透层,属于封堵,有利于建南构造志留系形成封存箱,建深1井志留系中层层含气以及韩家店组获得的工业气流亦证实其封堵性。上、中寒武统储层部分渗漏;下寒武统石龙洞组目的层对置差储层,属于次封堵。

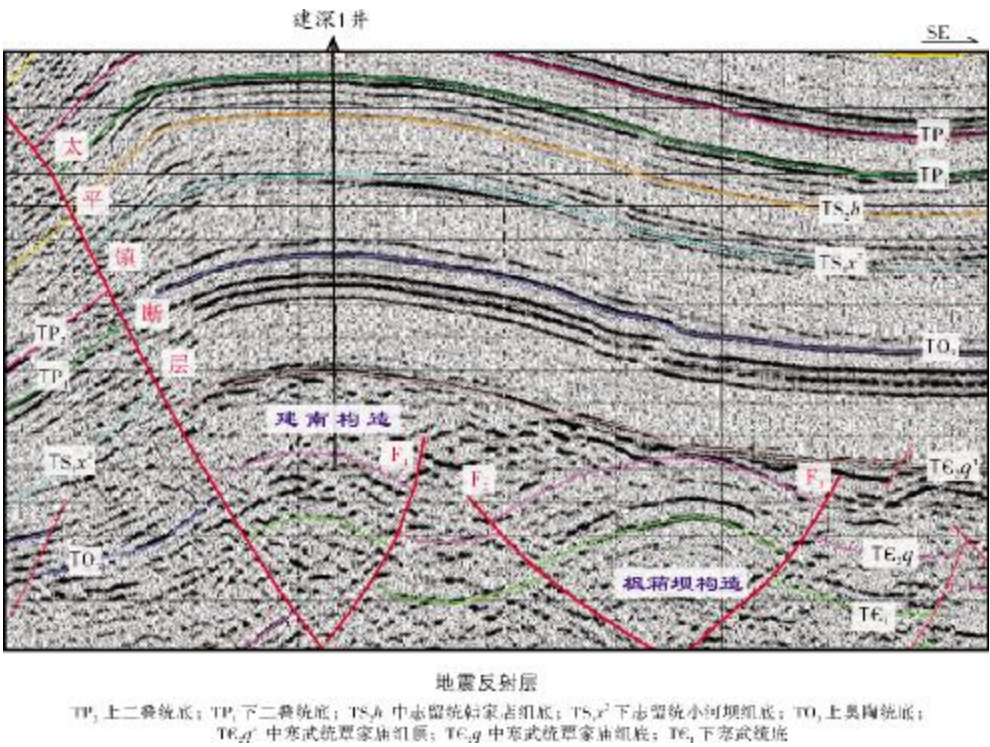


图4 建南构造 InLine1196 测线地震地质解释剖面
剖面位置见图2

2 流体的化学行为轨迹

流体的化学行为轨迹记录了流体形成和改造的过程,因此追踪流体行为轨迹具有重要意义。以鄂西渝东区建南构造建 38 井为例,主要从碳、氧、锶稳定同位素来进行示踪流体的化学行为轨迹。

2.1 碳、氧同位素地球化学特征

鄂西渝东区建 38 井下三叠统飞仙关组三段 3153.20 m 灰岩(围岩)碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 3.956‰,氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -6.401‰,裂缝中方解石脉体的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 3.748‰和 -6.611‰。早三叠世正常海水的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 1‰~5‰之间, $\delta^{18}\text{O}$ 的值在 -6.5‰~0 之间,脉体与围岩的碳、氧同位素均在早三叠世正常海水的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值范围之内,表明围岩的碳、氧同位素没有受到外来流体混入和交替影响。

2.2 锶同位素地球化学特征

鄂西渝东区建 38 井下三叠统飞仙关组三段围岩的锶同位素 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(0.707 6)与早三叠世正常海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(0.707 6)相一致,亦表明围岩没有受到外来流体影响,较好地保留了其原始沉积时海水的锶同位素特征。飞仙关组三段深度 3 151.42 m 和 3 153.20 m 附近围岩裂缝中充填物方解石脉 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值均为 0.707 5,脉体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值与早三叠世正常海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(0.707 6)相近,也与晚二叠世海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 高值(0.706 7~0.707 6)相近,但由于脉体与围岩之间有较明显的碳氧同位素差异,因此形成脉体的流体可能还是来自于早三叠世地层本身。

2.3 志留系的流体行为轨迹证据

建 38 井下三叠统飞仙关组流体碳、氧、锶同位素特征分析表明,该区下三叠统飞仙关组中的流体极可能来自于本身。但是,从充填于飞仙关组三段 3153.20 m 围岩(灰岩)裂缝中方解石脉内的流体包裹体拉曼光谱和测温分析表明,有机包裹体主要以液相甲烷为主,而本区下三叠统飞仙关组本身并不具有生烃潜力,这说明充填于裂隙中的液态甲烷应当是来自于下三叠统飞仙关组以外的地层。其下伏长兴组、茅口组、栖霞组均有明显的气显示,且由下至上含气级别呈增加趋势,而二叠系本身也是区域上的主力烃源层,结合包裹体的均一温度

(132~148 ℃)推测,下三叠统飞仙关组中的天然气可能来自于下伏的二叠系。

虽然志留系是本区的主力烃源层,但上述分析表明飞仙关组中既缺少下伏古生界的盐水流体又无来自志留系的烃源,这说明志留系中的流体是相对封闭的。

3 封存箱的演化及油气成藏过程

3.1 印支期及以前

三叠纪以前,鄂西渝东区处在恩施凹陷与乐山—龙女寺隆起间的斜坡带之上,斜坡的平均坡角大约 0.8°。在此背景下,巨厚的志留系砂泥互层沉积为流体封存箱的形成奠定了基础。

3.2 印支期—早燕山早期

三叠纪,构造圈闭雏型形成,同时志留系烃源岩主体部分从晚三叠世开始大量生油,储层中主要捕获液态含烃包裹体,包裹体均一温度范围在 100~120 ℃。随着志留系烃源岩不断成熟,至早侏罗世,志留系烃源岩进入湿气阶段,形成大量的天然气,储层中捕获大量气态含烃包裹体(图 5)。

该时期封存箱内一方面由于志留系快速深埋,孔隙不断减小,封闭能力增强,顶、底板的封油指数和封气指数分别达到 10.19 cm^{-3} 和 0.026 cm^{-3} ; 另一方面,因泥岩的成岩阶段蒙脱石向伊利石转化而产生的脱水以及因地温升高而生成的油气越来越多,导致箱内压力也越来越大,油气向上突破,以致于形成微裂缝,建深 1 井志留系岩心可以观察到大量的垂直裂隙可以佐证。随着压力的释放,裂缝闭合,然后再随着压力的聚集,再次突破。如此幕式闭合—开启—闭合旋回形成了志留系流体封存箱内龙马溪组、小河坝组、韩家店组层层含气的特点。

3.3 早燕山中—晚期

中晚侏罗世,研究区志留系一直处于深埋期,聚集在志留系中的原油开始大量地裂解生气,成为烃源岩生烃后接力供烃灶,其中龙马溪组古气藏供气强度达到最大值,为 $23.54 \times 10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$ 。小河坝组和韩家店组古气藏供烃期较龙马溪组略晚,为晚侏罗世(178 Ma~137 Ma),小河坝组古气藏阶段供气强度为 $29.88 \times 10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$,韩家店组古气藏阶段供气强度

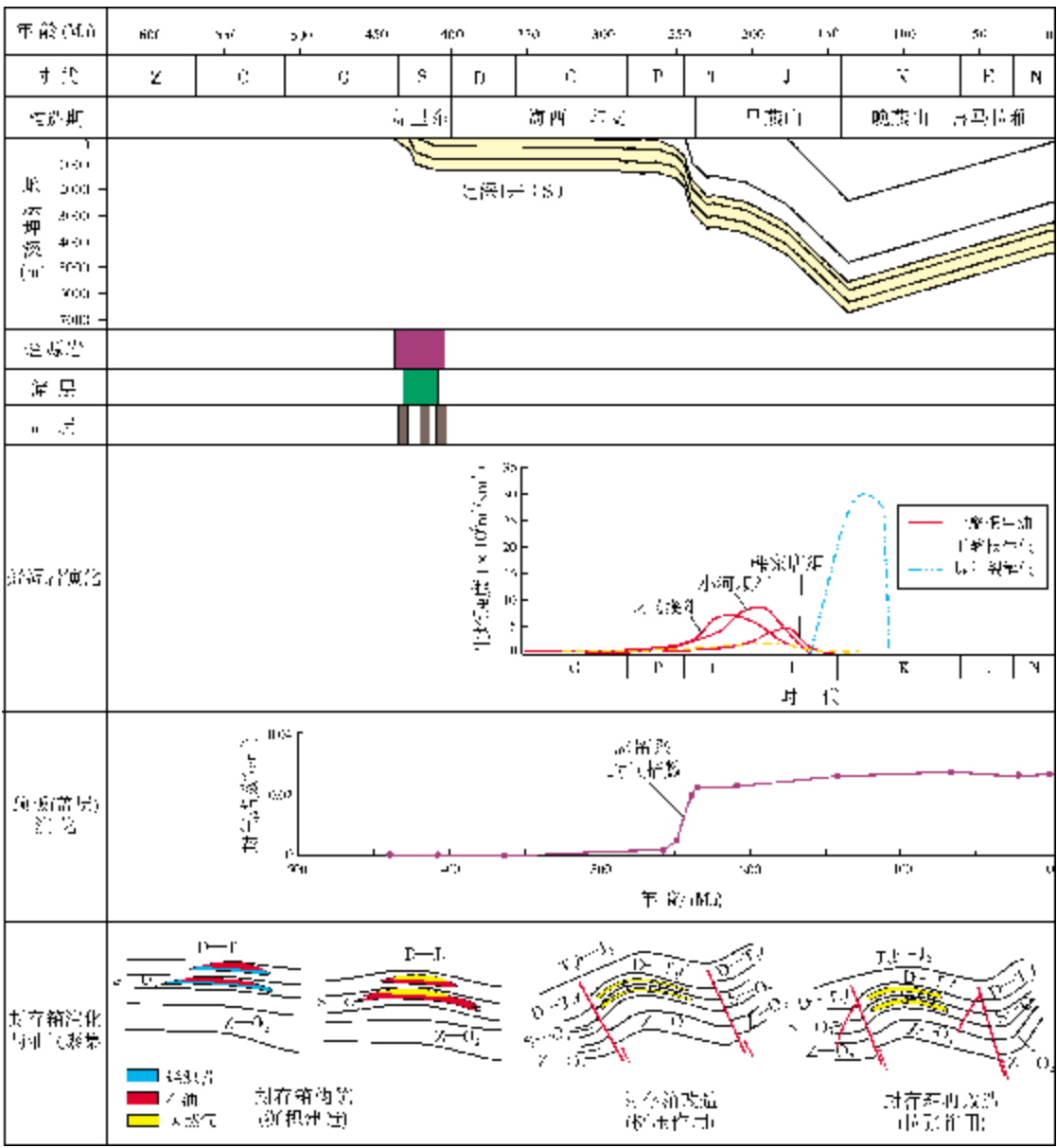


图5 鄂西渝东区志留系封存箱演化与油气成藏过程图

为 $26.02 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。该阶段中,储层中的包裹体也主要为气态烃包裹体、含气态烃盐水包裹体,包裹体主要分布在石英次生加大边和裂缝中。从激光拉曼光谱和组分特征分析,包裹体组分中主要为甲烷和二氧化碳,乙烷及以上气态烃几乎不含,还含有少量的氮气和硫化氢,分别为 2.2%和 1.8%。

由于晚侏罗世的构造挤压作用,使得志留系封存箱内部砂岩层和一些薄泥页岩层系形成大量的裂缝,为天然气的聚集提供了空间。而随着志留系埋深的继续加大,孔隙结构进一步缩小,志留系封存箱外部封闭能力逐渐增强,同时形成的大背斜对天然气

的聚集也有利,使得志留系油气得以保存。而随着志留系封存箱内压力的增加,封存箱又进入下一次幕式开启、闭合^[9-10]。这样如此反复,志留系封存箱的顶板部分发生破裂,顶、底板的封油、封气指数下降,分别降到 9.35 cm^3 和 0.025 cm^3 ,致使志留系气藏上部韩家店组天然气外泄至上部其他层位,从而导致韩家店组气层的压力系数比志留系下部的小(表 1)。

3.4 晚燕山—喜马拉雅期

白垩纪以后,受强烈挤压造山作用的影响,早期构造被改造,形成现在的川东隔挡式和两翼不对称

的高陡构造格局。

喜马拉雅期,阶段供烃强度为零(有少量脱附出来的气体),龙马溪组累积可聚集的供烃强度进一步降低为 $18.55 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,小河坝组为 $25.13 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,韩家店组 $21.05 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。喜马拉雅晚期,因印度板块向亚洲板块俯冲,其产生的强烈挤压应力越过龙门山经过四川盆地弱波及本区,叠加在早燕山期先形成的构造上,使早期构造在强度上得到一定的强化。

喜马拉雅期最主要的构造事件在区内表现为垂直隆升作用,并且在横向上具有一定的差异性;在鄂西渝东不同地区导致了差异性的剥蚀作用,但对建南地区志留系气藏影响较小,顶、底板封油、封气指数基本保持了上一构造时期的特征,是志留系气藏得以保存下来的因素之一。

4 结 论

天然气的生成、运移和聚集是连续统一的动态平衡过程。在岩石已致密化的条件下,天然气富集成藏应具有适度的储集空间,否则其富集成藏将十分困难。而构造活动过强会造成流体封存箱的泄压,又会促使天然气散失而难以保存。鄂西渝东区主力烃源岩在中晚侏罗世进入生气高峰期,不断生成的天然气首先向较早形成的圈闭中充注,随着生烃过程的继续进行或原生气藏的改造,天然气又可以通过断裂进入到上覆地层,持续供给烃源。

综上所述,鄂西渝东区志留系碎屑岩的成藏机制

是一个以泥质岩类烃源岩动态生烃,以及天然气“多层多箱”封存,箱内“自源、自储、自盖”成藏,封存箱的构筑、改造与定型呈幕式闭合—开启—闭合旋回的模式。因而,鄂西渝东区建深1井志留系龙马溪组、小河坝组以及韩家店组具有层层含天然气的独特性。

参 考 文 献

- [1] Barker C. Aquathermal pressuring: Role of temperature in development of abnormal-pressure zone[J]. AAPG Bulletin, 1972, 56(6): 957-973.
- [2] Powley D E. Pressures and hydrogeology in petroleum basins [J]. Earth Science Reviews, 1990, 29: 215-226.
- [3] 肖开华. 中国南方志留系油气地质特征与勘探方向. 天然气工业, 2009, 29(11): 1-4.
- [4] 柳广第, 郝石生. 塔里木盆地的流体封存箱及其油气意义 [C]//朱筱敏. 石油地球科学技术进展论文集. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- [5] 王屿涛, 范光华, 蒋少斌. 准噶尔盆地腹部高压和异常高压对油气生成和聚集的影响[J]. 石油勘探与开发, 1994, 21(5): 1-7.
- [6] 郝石生, 高耀斌, 黄志龙. 鄂尔多斯盆地中部大气田聚集条件及运聚平衡[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 1996, 26(6): 488-492.
- [7] 杨兴业, 何生. 超压封存箱的压力封闭机制研究进展综述 [J]. 地质科技情报, 2010, 29(6): 66-72.
- [8] 胡晓凤, 王韶华, 盛贤才, 等. 中扬子区海相地层水化学特征与油气保存[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(2): 32-37.
- [9] 周兴煦. 封存箱辨义及主要类型[J]. 石油实验地质, 2006, 28(5): 424-429.
- [10] 田世澄, 陈永进, 施凤成, 等. 异常压力封存箱在油气成藏中的作用[J]. 地学前缘, 2004, 11(3): 283-284.

编辑:赵国宪

Evolution of Silurian Fluid Compartments and Gas Accumulation in Western Hubei-Eastern Chongqing Area

Hu Xiaofeng, Ding Qing

Abstract: The Silurian strata distributed in the Western Hubei-Eastern Chongqing area were counted once as source rock or cap rock for a long time due to low mature prospecting but the past concept has changed with discovering high-pressured commercial gas flow in Well JS-1 in this area. By analysis of the hydrocarbon accumulation and the fluid behavior tracing from isotope $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, it is shown that the Silurian strata are characterized by self-source hydrocarbon and self-reserving conditions with relatively independent fluid sealing, which is the dominant causation to bring on several abnormally high-pressured fluid compartments from the Lower Silurian Longmaxi and Xiaoheba Formations to the Middle Silurian Hanjiadian Formation. In the whole evolution process, the Silurian hydrocarbon accumulation and preservation have been well under control of the Silurian compartments which were formed before Early Yanshanian, reformed during the middle to late phases of Early Yanshanian and shaped during Late Yanshan-Himalayan periods.

Key words: Silurian; Fluid compartment; Gas accumulation; Isotopic geochemistry; Western Hubei; Eastern Chongqing
Hu Xiaofeng: female, Senior Geologist. Add: Exploration and Development Research Institute, SINOPEC Jiangnan Oilfield Company, Qianjiang, Hubei, 433124 China