四川盆地川东南地区"源一盖"匹配关系研究

袁玉松,孙冬胜,周雁,李双建,汪新伟,张荣强,沃玉进,郑和荣 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院,北京,100083

内容提要:采用重建烃源岩生烃史("源")和泥质盖层排替压力演化史("盖")的方法,研究源一盖动态匹配关系,以确定泥质盖层封闭动态有效性。针对川东南地区丁山1井泥质盖层封闭性的研究结果表明:川东南地区寒武系泥质盖层不仅封闭性能形成时间早(早于震旦系烃源岩生烃时间),而且排替压力大(最大排替压力高达26 MPa),封闭能力强,具备封闭超高压气藏的能力,"源一盖"匹配关系好,对下伏烃源岩具备有效封盖作用;志留系泥质盖层 虽然现今排替压力较大,但封闭性形成时间晚于下伏寒武系烃源岩生烃时间,"源一盖"匹配关系不理想,有效封闭 性较差;二叠系和三叠系泥质盖层封闭性形成时间分别早于志留系和二叠系烃源岩的生烃时间,具备有效封闭能力,且最大排替压力都大于10 MPa,可封闭高压气藏。

关键词:泥质盖层;生烃史;排替压力史;封闭有效性;"源一盖"匹配;川东南

油气成藏要素中,生烃是基础,圈闭是条件,保 存是关键(李明诚和李伟,1997)。"源一盖"控烃理 论明确指出,只要发育优质的烃源岩、良好的区域盖 层,就必然具有丰富的油气资源和良好的勘探潜力 (金之钧等[•])。油气勘探实践和综合研究表明,保 存条件是中国南方海相油气成藏的关键要素(梁兴 等,2004;袁彩萍等,2005;楼章华等,2006;沃玉 进等,2006;肖开华等,2006)。但是,如何正确认 识和评价保存条件,如何有效开展中国南方海相油 气勘探研究工作,已经成为摆在中国南方油气勘探 研究面前的突出问题(金之钧等,2006)。如何从动 态演化的角度定量评价泥质盖层建造阶段的封闭性 及有效性是本文要尝试解决的问题。

盖层建造阶段封闭有效性指盖层封闭性的形成 时间早于(至少不晚于)下覆烃源岩的生烃时间。通 常情况下,石油很容易被封住,因此,本文着重关注 盖层封闭天然气的形成时间是否早于下覆烃源岩干 酪根的生气时间来评价"源一盖"匹配关系。采用重 建盆地热演化史、定量计算烃源岩的生烃史;利用泥 岩孔隙度和排替压力实测数据资料,求取孔隙度与 排替压力之间的相关关系,通过埋藏史恢复,计算泥 质盖层的孔隙度演化史,进而计算盖层的排替压力 演化史;分析下伏烃源岩的生烃史与上覆泥质盖层 的排替压力演化史的时间匹配关系,即"源一盖"匹 配关系,确定盖层封盖油气的动态有效性。四川盆 地中三叠统膏盐岩对天然气的封盖起重要作用,但 在川东南地区的构造高部位,这套膏盐岩已被剥蚀 殆尽因此,泥质盖层的封闭性对于该地区的油气保 存至关重要。丁山1井位于盆地边缘,可用其盖层 有效性分析推测川东南地区,从而具有代表性,故本 文选取丁山1井为例来研究该区泥质盖层封闭动态 演化及有效性。

值得说明的是,本文是关于泥质盖层封闭动态 演化及有效性问题研究的阶段性成果,即初步解决 了泥质盖层建造阶段的封闭性动态演化及有效性研 究问题。对于中国南方海相油气勘探来说,虽然改 造阶段的封闭性演化是一个更为重要的问题,但同 时又是更为复杂的问题,尤其是改造阶段盖层封闭 性的定量研究方法,评价指标等问题目前都没有明 确,因此本文尚未涉及构造改造阶段封闭性演化的 内容。

1 烃源岩与盖层发育特征

川东南地区丁山1井自上而下钻遇了下三叠统 茅草铺组、夜郎组,上二叠统长兴组、龙潭组,中二叠 统茅口组、栖霞组、下二叠统梁山组,中志留统韩家 店组,下志留统石牛栏组、龙马溪组,上奥陶上统五 峰组、涧草沟组,中奥陶统宝塔组、十字铺组,下奥陶

收稿日期:2009-11-18;改回日期:2010-10-20;责任编辑:章雨旭。

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号 40974048)、国家科技重大专项(编号 2008ZX05005)的成果。

作者简介:袁玉松,男,博士后。高级工程师。地热学、石油地质专业。主要从事盆地热演化研究。Email: ysyuan@126.com。

统牯牛潭组、湄潭组、红花园组、桐梓组,中一上寒武 统娄山关群、中寒武统石冷水组、陡坡寺组,下寒武 统清虚洞组、金顶山组、明心寺组、牛蹄塘组以及震 旦系灯影组(未穿)。揭示了震旦系灯影组、下寒武 统牛蹄塘组、下志留统龙马溪组和二叠系4套海相 烃源岩。灯影组底部烃源岩有机碳含量为1.0%; 牛蹄塘组有机碳含量最大1.65%,最小0.45%,平 均0.778%,热演化程度高,Ro普遍大于3.2%;龙 马溪组有机碳含量最大1.21%,最小0.8%,平均 1.066%,Ro普遍大于2.6%;龙潭组有机碳含量为 2.1%,热演化程度亦接近过成熟干气阶段,Ro普遍 在2.0%左右。

丁山1井下寒武统牛蹄塘组和下志留统龙马溪 组泥质岩含量高、厚度大,为川东南地区的区域性盖 层。牛蹄塘组泥质岩类单层厚度最大28.5 m,一般 厚度6.0 m,总厚度111.1 m。龙马溪组上部为厚 层灰质泥岩,中部为厚层泥岩夹灰质泥岩,下部为厚 层碳质泥岩,泥质岩单层厚度最大48.2 m,累计厚 度144.5 m。下二叠统梁山组为深灰色泥岩,厚度 较薄,仅8.0 m,上二叠统龙潭组为黑色炭质泥岩, 厚度为92.5 m。此外,下三叠统夜郎组泥质岩含量 亦较高,单层最大厚度可达26.5m,泥质岩累计厚度 达144.3m。

2 热史恢复与烃源岩生烃史

沉积盆地热史恢复的原理与方法归纳起来有构造一热演化法(王良书和施央申,1989;何丽娟等, 1995;何丽娟,1996;何丽娟和熊亮萍,1998;邱楠 生等,2004)和古温标热史反演法(胡圣标和汪集 旸,1995;胡圣标等,1998;邱楠生等,2004)。前 者主要应用于拉张盆地,后者则只适合于在过去而 不是现今达到最高古地温的沉积盆地(胡圣标等, 1998)。中一上扬子地区经历过多期热事件,晚期发 生了显著的抬升剥蚀和冷却过程,因此,古温标热史 反演法适合于川东南地区的热史恢复。

2.1 钻井热流史

利用古温标 Ro数据,采用古热流法(Lerche et al.,1984;胡圣标等,1998)进行川东南地区丁山1 井热史恢复。结果显示(图1a):川东南地区古生代 期间热流不断增高,至中二叠世末(258Ma)达到最 大值(76mW/m²),自晚二叠世以来,热流逐渐降低, 现今地表热流为61 mW/m²。图1b展示了热史恢 复时古温标 Ro 实测值与计算值的拟合状况,可以 看出,二者拟合效果较好,热史路径可接受。

上扬子地区早古生代为克拉通盆地阶段,基底 热流较低,晚古生代为伸展裂陷阶段,在中二叠世末 发生大规模玄武岩喷发热事件,从而在大约 258Ma 时达到最高古热流;玄武岩喷发热事件的结束和印 支一燕山期的持续沉降充填,造成晚二叠世以来热 流降低的冷却过程。喜马拉雅期的强烈抬升剥蚀, 盆地进一步冷却。可见,丁山1井热史反演结果与 区域构造演化和岩浆活动活动热事件吻合。

2.2 烃源岩生烃史

近年来的研究表明,当地层温度升高到一定程度,原油可以裂解为天然气。原油开始大量裂解生 气对应的 Ro 值为 1.6%,原油裂解的主生气期对应 Ro 值为 1.6%~3.5%;而Ⅱ型干酪根开始大量裂 解生气对应的 Ro 值为 1.1%,主生气期 Ro 值为 1.1%~2.6%(赵文智等,2005;赵文智等,2006)。 综合考虑最新研究进展、行业标准以及南方海相烃 源岩高热演化和多元生烃的特点(金之钧和张金川, 2003;金之钧和蔡立国,2007),在本次研究中,将



图 1 川东南地区丁山 1 井热史恢复结果;(a) 地表热流史;(b)Ro 实测值与模拟值对比 Fig. 1 Map showing the results of thermal history reconstruction in the Drill Dingshan-1, southeast Sichuan basin heat flow history; (b) fitness of the modeled and measured Ro



图 2 川东南地区丁山 1 井泥质盖层孔隙度演化史 Fig. 2 Porosity histories of the mudstone cap—rocks in Dingshan-1, southeast Sichuan basin

有机质热演化程度指标 Ro=0.5% 划为生烃开始; Ro=0.5%~1.3% 为生油期,其中 Ro=0.5%~ 0.7%为生油早期,Ro=0.7%~1.3%为生油高峰 期;Ro=1.3%~3.5%为生气期,其中,Ro=1.3% ~2.6%为干酪根主生气期,Ro=1.6%~3.5%为 原油裂解气期;Ro>3.5%,生烃潜力基本枯竭。

基于钻井热流史,结合埋藏史,采用 EASY% Ro 模型(Sweeney & Burnham, 1990)计算生烃史, 结果显示(参见后文图 4):震旦系灯影组底部和下 寒武统牛蹄塘组底部生烃时间分别始于晚寒武世和 早奥陶世,生气开始时间都始于早二叠世末,震旦系 烃源岩干酪根主生气期为晚二叠世一中三叠世,现 今 Ro 为 4.4 %; 寒武系烃源岩干酪根主生气期为 晚二叠世一早侏罗世;现今 Ro 为 3.9 %。下志留 统龙马溪组底部烃源岩在早二叠世中期开始生油, 中侏罗世中期一早白垩世中期为干酪根主生气阶 段,晚侏罗世早期一早白垩世末为油裂解生气阶段, 现今 Ro 为 2.7 %。下二叠统烃源岩在中三叠世末 开始生油,中侏罗世末开始生气,晚侏罗世中期一早 白垩世末为干酪根主生气阶段,早白垩世期间为油 裂解生气阶段,现今 Ro 为 2.2 %。上二叠统烃源 岩三叠纪末开始生油,晚侏罗世中期一早白垩世晚 期为干酪根主生气阶段,早白垩世中期进入油裂解 生气阶段,早白垩世末生烃过程结束,现今 Ro 为 1.9 %。

3 泥质盖层排替压力史重建

排替压力史重建是基于孔隙度史重建之基础上 的。泥质盖层的孔隙度演化与埋藏史密切相关,在 已知埋藏史的条件下,依据地层初始孔隙度、地层孔 隙度随深度变化关系以及地层岩性指数等参数即可 求取地层孔隙度演化史。

3.1 复杂岩性条件下地层孔隙度一深度关系模型

沉积物的压实作用从开始埋藏一直可持续到埋 深 9000 多米,压实过程中沉积物的孔隙度随深度增 加而减小。在正常压实的情况下,砂泥岩孔隙度衰 减曲线近似遵循指数分布(Athy, 1930):

 $\varphi = \varphi_0 e^{-CZ}$

式中: φ ,深度 Z 处的岩石孔隙度,小数; φ_0 ,沉 积物在地表的原始孔隙度,小数; C:因次常数 (m⁻¹)。C 值反映正常压实状态下孔隙度随深度变 化的快慢程度,在孔隙度(横坐标,对数)与深度(纵 坐标,算术)的压实曲线上为正常压实趋势线的斜 率,亦即压实系数。C 值一般变化在 0.0001~ 0.001 m⁻¹之间(Magara, 1978)。

碳酸盐岩(特别是颗粒支撑的粒屑灰岩)的压实







(data from: You Xiuling et al. •; Zhang Wenda et al. •; Li Guoping et al., 1996; Zhang Meizhen et al., 2007)

作用也很明显,其孔隙度随深度变化也有类似的趋势(Schmoker, 1984)。

由于不同岩性的压实系数不同,比如砂岩和泥 岩之间的压实系数差别很大。不同时代地层往往由 多种岩性组成,甚至可能同时包含碎屑岩和碳酸盐 岩。在地层由多种岩性组成的复杂岩性条件下,地 层孔隙度随深度变化关系式可改进为:

$$\Phi = P_1 \Phi_1 e^{-C_1 Z} + P_2 \Phi_2 e^{-C_2 Z} + P_3 \Phi_3 e^{-C_3 Z} +$$

 $\cdots + P_n \Phi_n \mathrm{e}^{-C_n Z}$

式中, ϕ ,地层孔隙度; P_1 , P_2 , P_3 ,…, P_n ,地层岩性 百分含量; ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 ,…, 1)。压实规律与埋藏史结合,即可获得泥质盖层的 孔隙度演化史。

川东南丁山1井揭示了下寒武统牛蹄塘组、下 志留统龙马溪组、下二叠统梁山组、上二叠统龙潭 组、三叠系底部等5套泥质盖层。孔隙度演化史重 建结果显示(图2):牛蹄塘组和龙马溪组泥质盖层 早古生代期间孔隙度快速降低,至志留纪末,它们的 孔隙度分别降低至10.0%和26.5%,泥盆纪一石炭 纪期间孔隙度保持不变,自二叠纪开始,因重新埋 深,孔隙度再次降低,至早白垩纪末,孔隙度降低至

表 1	碎屑岩初始孔隙度与压实系数表
1X I	叶府石仍和几际及马上大示奴衣

Φ",对应岩性沉积物初始
孔隙度; C_1 , C_2 , C_3 , …,
C _n ,对应岩性压实系数,
m ⁻¹ ; Z,深度,m。

可见,只要已知初始 孔隙度、压实系数和埋深, 就可以计算出地层孔隙 度。在本文中,地层初始 孔隙度和压实系数采用已 发表的文献数据(见表

Table 1 Original porosity and compaction coefficient of clastic rocks

数,	岩性	初始孔隙度(%)	数据来源	压实系数(m ⁻¹)	数据来源
	粗砂岩	40~44	杨桥和漆家福,2003		
	中砂岩	$44 \sim 48$	刘国勇和杨明慧,2004		
始	细砂岩	$50 \sim 60$	漆家福和杨桥,2001	0.00027	Allen & Allen, 1990
罙,	粉砂岩	$55 \sim 65$	漆家福和杨桥,2001		Allen & Allen, 1990
階	泥质砂岩	56	Allen & Allen, 1990	0.00039	Allen & Allen, 1990
际	泥岩	60~70	漆家福和杨桥,2001	0.00051	Allen & Allen, 1990
始	页岩	63	Allen & Allen, 1990	0.00051	Allen & Allen, 1990
旧	粘土	$52 \sim 68$	杨桥和漆家福,2003	0.00071	Allen & Allen, 1990
		•			

最低值(分别为1.5%和2.3%);梁山组、龙潭组、三 叠系底部泥质盖层在三叠纪一侏罗纪末孔隙度快速 降低,侏罗纪末分别降至4.6%、4.3%和5.0%;早 白垩世期间孔隙度进一步降低,并到达最小值(分别 为3.4%、3.1%、3.5%)。

2.2 孔隙度一排替压力关系模型的建立

地层孔隙度与排替压力之间存在明显的相关 性。总孔隙度越小,压实程度越高,孔隙喉道半径越 小,泥岩孔隙毛细管力越大,渗透率越低,排替压力 越大。由 117 对孔隙度一排替压力数据拟合得到孔 隙度与排替压力的关系式(图 3):

 $P = 24.799 \times \Phi^{-0.8189}$

式中,P为排替压力,MPa; ϕ 为地层总孔隙度,%。

当总孔隙度为 25%时,排替压力趋于极小稳定 值,总孔隙度为 0.5%左右时,排替压力趋于极大稳 定值。总孔隙度在 2%~7%之间变化时,排替压力 变化于 14~5 MPa 之间,对排替压力的影响最为显 著,是影响盖层质量的敏感区间。

在获得地层孔隙度演化史之后,由上述孔隙 度一排替压力关系模型,即可求得地层排替压力演 化史。

3.2 盖层排替压力史

依据上述孔隙度一排替压力关系模型的排替压 力史计算结果显示(图 4):川东南地区丁山1井下 寒武统牛蹄塘组底部的排替压力在寒武纪末大于 1MPa、在志留纪末达到 6.0MPa;在晚三叠世中期 大于 10MPa;早侏罗世末大于 15 MPa;早白垩世末 达到最大值(26.3 MPa)。志留系底部的排替压力 在志留纪末大于 1MPa,至晚三叠世大于 5MPa,至 中侏罗世中期达到 10.1 MPa,早白垩世末达到最大 值(15.8 MPa)。下二叠统底部的排替压力在早侏 罗世早期达到 5 MPa,晚侏罗世中期大于 10MPa, 早白垩世末达到 13.2 MPa。上二叠统底部的排替 压力在早侏罗世早期大于 5 MPa,晚侏罗世晚期排 替压力大于 10 MPa,早白垩世末达到最大值 13.9 MPa。下三叠统底部的排替压力在早侏罗世晚期已 经大于 5 MPa,在早白垩世中期大于 10 MPa,早白 垩世末达到 12.7 MPa。

4 "源一盖"匹配关系

4.1 排替压力与封闭能力

目前国内外在进行盖层封闭能力评价主要选用 排替压力作为评价参数(梁秋原等,2002)^Φ。但目 前尚无统一的分级标准。陈章明和吕延防研究认 为,当泥质盖层渗透率低于 10⁻⁵μm²,即大致相当于 排替压力大于 1MPa 时,泥岩初具封闭能力(陈章明 和吕延防,1990)。这个量值所对应的泥岩总孔隙 度约 30%,从成岩角度考虑,只要泥岩埋深达



图 4 川东南地区丁山 1 井盖层排替压力史

Fig. 4 Sealing history of caprocks of well Dingshan-1 in southeast Sichuan basin

2010 年

1000m 左右, 泥岩总孔隙度即可由 70%降低到 30%, 具备封闭油气藏的能力。因此, 孔隙度 30%、 排替压力 1MPa 这个量值可以作为泥岩盖层封闭油 气的下限值(李国平等, 1996)。

天然气分子直径更小,对盖层封闭性要求更苛 刻。赵庆波等(1994)研究认为,当排替压力大于 15MPa时,泥质盖层能封住超高压气藏,当排替压 力为10~15MPa时,能封住高压气藏,当排替压力 为5~10MPa时,能封住常压气藏,当排替压力小于 5MPa时,只能封住低压气藏。据此以及下文将要 讨论的泥质盖层排替压力演化特征,本项目取排替 压力1.0MPa(大致与孔隙度等于30%相对应)作为 封闭石油的下限值,排替压力5MPa(大致与孔隙度 等于9%相对应)作为能够封闭天然气藏的下限值, 常压气藏、高压气藏、超高压气藏的泥质盖层排替压 力范围分别为:5~10 MPa、10~15 MPa 和>15 MPa。

4.2 "源一盖"匹配关系

将上述丁山1井的烃源岩生烃史和泥质盖层排 替压力演化史用图3表示。从图3可以看出,下寒 武统牛蹄塘组泥质盖层对下伏烃源具备有效封盖能力。寒武系泥质盖层封闭性能形成时间早,早于震旦系烃源岩生烃时间,在震旦系烃源岩主生气期之前,牛蹄塘组已经具备封闭天然气的能力(排替压力大于 5MPa),在地质历史时期"源一盖"匹配关系好,而且最大排替压力高达 26 MPa,封闭能力强,具备封闭超高压气藏的能力。

志留系泥质盖层对下伏烃源有效封闭性不理 想。尽管志留系泥质盖层在侏罗纪一白垩纪时排替 压力大、封闭能力强,但其封闭性形成时间晚于下伏 烃源岩的生烃时间,"源一盖"匹配关系不理想(图 5)。由于志留系沉积之后,未经强烈埋深压实作用 就因加里东构造运动抬升至地表,上部遭受剥蚀,直 到二叠纪才重新沉降埋深,进一步压实,晚三叠世末 才具备封闭天然气的能力,而此时,下伏烃源岩(震 旦系、寒武系)的干酪根主生气期已经基本结束,原 油裂解气也已经大量转化完成。

二叠系和下三叠统泥质盖层具有优质且有效的 封盖性能,排替压力大,封盖能力强,而且"源一盖" 匹配关系好(图 5),在志留系和二叠系烃源岩分别



图 5 川东南地区丁山 1 井"源一盖"匹配关系图

Fig. 5 Map showing "source-cap rock" relationship in Dingshan-1, southeast Sichuan basin

进入主生气期之前,它们对天然气的封闭能力已经 形成,因此,二叠系和下三叠统泥质盖层分别对下伏 志留系和二叠系烃源岩生成的油气具备动态封盖有 效性。

5 结论

(1)川东南地区经历了古生代期间热流不断升高、早二叠世末(258M)达到最高古热流(约76mW/m²)的加热过程和晚二叠世以来热流分阶段降低的冷却过程。

(2)震旦系灯影组底部和寒武系牛蹄塘组底部 烃源岩在早古生代生油,二叠纪至侏罗纪为生气阶 段,侏罗纪末因演化程度过高而终止生烃过程。志 留系和二叠系烃源岩的主生气阶段为侏罗纪至早白 垩世末,早白垩世末因抬升冷却,导致生烃过程终止。

(3)川东南地区寒武系牛蹄塘组泥质盖层封闭 天然气的形成时间早于下伏烃源的生烃开始时间, 具备动态有效封闭性;志留系龙马溪组泥质盖层虽 然现今排替压力大、封闭性能强,但对天然气封闭性 的形成时间晚于下伏烃源岩生烃开始时间,"源— 盖"匹配关系不理想,动态有效封闭性较差;二叠系 和下三叠统泥质盖层分别对志留系和二叠系烃源岩 生成的烃类具备动态有效封闭性。

注释 / Notes

- 金之钧等.2007.国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(编号 2005CB422100)中国海相碳酸盐岩层系油气富集机理与分布预测项目中期总结报告.99~100.
- ❷游秀玲,关勇,王青.1990.天然气盖层评价方法及地质应用.地质 矿产部石油地质研究所.
- 张文达,肖无然,陈伟钧,金聚畅.1990.天然气盖层研究.地质矿 产部石油地质中心实验室.
- 梁秋原,赵泽恒,刘映辉,程胜辉,叶晓斌,陈坚.2002. 滇黔桂海相 新区油气保存条件研究.中石化南方分公司.

参考文献 / References

- 陈章明和吕延防.1990. 泥岩盖层封闭性的确定及其与源岩排气史的 匹配. 大庆石油学院学报,14(2):1~7.
- 何丽娟.1996.拉张盆地的热演化模拟研究——以南海盆地和辽河盆 地为例(博士论文).中国科学院地质与地球物理研究所.
- 何丽娟, 熊亮萍. 1998. 拉张盆地构造热演化模拟的影响因素. 地质 科学, 33(2): 222~228.
- 何丽娟,熊亮萍,汪集旸,王克林.1995. 沉积盆地多次拉张模拟中拉 张系数的计算.科学通报,40(24):2261~2263.
- 胡圣标, 汪集旸. 1995. 沉积盆地热体制研究的基本原理和进展. 地 学前缘, 2(4): 171~180.
- 胡圣标,张容燕,周礼成.1998.油气盆地热史恢复方法.勘探家,3

(4): 52~54.

- 金之钧,蔡立国.2007.中国海相层系油气地质理论的继承与创新. 地质学报,81(8):1017~1024.
- 金之钧,龙胜祥,周雁,沃玉进,肖开华,杨志强,殷进垠.2006.中国南 方膏盐岩分布特征.石油与天然气地质,27(5):571~583.
- 金之钧, 张金川. 2003. 天然气成藏的二元机理模式. 石油学报, 24 (4): 13~16.
- 李国平,郑德文,欧阳永林,冯恩源.1996.天然气盖层研究与评价. 北京:石油工业出版社.
- 李明诚,李伟.1997.油气成藏保存条件的综合研究.石油学报,18 (2):41~48.
- 梁兴,叶舟,马力,吴少华,张廷山,刘家铎,徐克定.2004.中国南方海 相含油气保存单元的层次划分与综合评价.海相油气地质,9 (1):59~76.
- 刘国勇,杨明慧.2004.沉积盆地波动过程分析方法在中国的应用. 世界地质,23(3):295~300.
- 楼章华,马永生,郭形楼,朱蓉.2006.中国南方海相地层油气保存条 件评价.天然气工业,26(8):8~11.
- 漆家福,杨桥.2001.关于碎屑岩层的去压实校正方法的讨论——兼 讨论李绍虎等提出的压实校正法.石油实验地质,23(3):351 ~356.
- 邱楠生,胡圣标,何丽娟.2004. 沉积盆地热体制研究的理论与应用. 北京:石油工业出版社,6~9.

王良书,施央申.1989.油气盆地地热研究.南京:南京大学出版社.

- 沃玉进,肖开华,周雁,杨志强.2006.中国南方海相层系油气成藏组 合类型与勘探前景.石油与天然气地质,27(1):11~16.
- 肖开华,沃玉进,周雁,田海芹.2006.中国南方海相层系油气成藏特 点与勘探方向.石油与天然气地质,27(3):316~325.
- 杨桥,漆家福.2003.碎屑岩层的分层去压实校正方法.石油实验地 质,25(2):206~210.
- 袁彩萍,徐思煌,梅廉夫,郭形楼.2005.中国南方海相地层油气成藏 要素的层次性分析.石油天然气学报,27(2):137~141.
- 张美珍,曹寅,钱志浩.2007.石油地质实验新技术方法及应用.北 京:石油工业出版社.
- 赵庆波,杨金凤.1994.中国气藏盖层类型初探.石油勘探与开发,21 (3):15~23.
- 赵文智,汪泽成,王兆云,王红军.2005.中国高效天然气藏形成的基 础理论研究进展与意义.地学前缘,12(4):499~506.
- 赵文智,王兆云,张水昌,王红军,王云鹏,2006.油裂解生气是海相气 源灶高效成气的重要途径.科学通报,51(5):589~595.
- Allen P A, Allen J R. 1990. Basin analysis, principles and applications. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Athy L F. 1930. Density, porosity and compaction of sedimentary rock. AAPG Bull., 14(1): 1~24.
- Lerche I, Yarzab R F, Kendall C G S C. 1984. Determination of paleoheatflux from vitrinite reflectance data. AAPG Bulletin, 68: 1704~1717.
- Magara K. 1978. Compaction and Fluid Migration: Practical Petroleum Geology, Developments in Petroleum science. Amsterdam, Netherland: Elsevier.
- Schmoker J W. 1984. Empirical relation between carbonate porosity and thermal maturity: An approach to regional porosity prediction. AAPG Bull., 88(11): 1697~1703.
- Sweeney J J, Burnham A K. 1990. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. AAPG Bull., 74(10): 1559~1570.

Relationship between Hydrocarbon Generation History of Source Rocks and Sealing History of Mudstone Cap—rocks in the Southeast Sichuan Basin

YUAN Yusong, SUN Dongsheng, ZHOU Yan, LI Shuangjian, WANG Xinwei,

ZHANG Rongqiang, WO Yujing, ZHENG Herong

Research Institute of Petroleum Exploration & Development, SINOPEC, Beijing, 100083

Abstract: In order to determine the effectiveness of the mudstone cap—rocks in the southeast Sichuan basin, both hydrocarbon generation histories of source rocks and sealing histories of the mudstone cap—rocks are reconstructed. The results show that the sealing function of the Cambrian mudstone formed earlier than the onset of gas generation of the Sinian source rock and its maximum displacement pressure was as high as 26 MPa at the end of the Late Cretaceous. Writers, therefore, consider that the Cambrian mudstone was of effective sealing function with respect to the Sinian source rock before Late Cretaceous. Similarly, the Permian and Triassic mudstone cap—rocks were also of effective sealing function before being drastically exhumed or uplifted in the late tectonic events. However, the Silurian mudstone cap—rock was less effective in sealing the gas generated by the Cambrian source rock though its maximum sealing capacity (displacement pressure =16 MPa) is powerful enough to seal high pressure gas reservoir at the end of the Late Cretaceous.

Key words: mudstone cap—rock; hydrocarbon generation history; displacement pressure history; effective sealing function; "source—cover" coupling; southeast Sichuan basin

再论"地震预报的关键在于监测断层"

孙建中 长安大学,西安,710054

汶川地震的伤痛尚未抚平,玉树地震的灾难又接踵而 至,叫人好不揪心! 作为一个地质工作者我又一次因不能为 地震预报出谋划策而愧疚。唐山地震后我曾在学院的一次 学术会议上做过一次呼吁,汶川地震后我又写了一篇短文 《地震预报的关键在于监测断层》(孙建中,2009)进行呼吁, 现在,玉树地震又一次刺痛了我,我还要呼吁! 呼吁有关人 士把我国地震预报工作推向正确的高速轨道上去。

首先,地震能不能预报? 很多人都说,不能预报,世界上 所有国家都不能预报地震。特别是日本一名大学教授 R. J. 盖勒 1997 年在国际著名刊物《Science》上发表了"地震是不 可预报的"的文章(Geller et al., 1997)。还有一些学者,跳 不出地震波的圈子,想就地震预报地震。当小震闹大震到 时,似乎有一点希望;但是,当小震不闹大震也到时,就没办 法了。于是,使自己陷入了"制造永动机"(许绍燮,2003)的 怪圈,并从而得出地震不可预报的结论。然而,中国的事实 却有力的反驳了这种谬论。

我国曾经在世界上首次成功地预报了1975年2月辽宁 海城的7.2级地震,避免了大量生命财产的损失,取得了显 著的防灾减灾效果。据权威统计(岳明生,2005),在1975~2001年间,我国地震部门还成功地对23次破坏性地震进行 了预报,如:1975年7月孟连7.3级地震,1976年5月的云 南龙陵7.4级地震,1976年8月的四川松潘平武7.2级地 震,1982年6月四川甘孜的6.0级地震,1999年11月辽宁 岫岩5.4级地震,2000年6月甘肃景泰5.9级地震,2001年 10月云南永胜6.0级地震等(车用太等,2008,2009)。这些 事实充分地说明了地震是可以预报的。但是,无可讳言,我 国在现阶段地震预报的成功率还不是很高的。

但是唐山地震为什麽没有预报呢?事实上,唐山地震的 前兆是十分明显的。我的一位朋友那时正在唐山地区带领 一批学生做水文地质观测,那些日子突然发现井水位数据十 分异常,有的井水位突然下降几十米,有的井水位突然上升 几十米,有的竟突然喷出地表成为自流井。他意识到要发生 地震了,赶快疏散了学生,从而避免了伤亡。唐山广大群众 和基层地震工作者也都积累了大量地震前兆资料。但是,根 据《唐山大地震》(关仁山等,2010)一书的记载,唐山大地震 前有一个"黎明前的黑暗"或"激战前的寂静"也就是属于那

收稿日期:2010-07-11;改回日期:2010-10-15;责任编辑:章雨旭。

作者简介:孙建中,男,1931年生。教授。长期从事第四纪地质、环境地质及黄土学的研究与教学工作。通讯地址:710054,西安市雁塔路 126号,长安大学本部东院,13-2-1-2;Email: ssyssy8686@163.com。