

四川盆地寒武系盐相关构造及其控油气作用

李双建^{1,2}, 孙冬胜¹, 郑孟林¹, 孟宪武³(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石化构造与储层实验室, 北京 100083;
3. 中国石化西南油气分公司, 贵州 贵阳 550001)

摘要:四川盆地东部和南部中、下寒武统广泛发育膏盐岩层系,形成了多种样式的盐相关构造。依据露头、钻井和地震资料分析,认为四川盆地寒武系膏盐岩形成于克拉通内局限台地环境,具有时代老、埋藏深、厚度分布不均、膏多盐少及伴生岩石类型多样等特点。受膏岩和盐岩流动性差异、构造挤压、基底断裂和滑脱作用等多种因素影响,膏盐岩层系相关构造分层性明显。盐上层表现为背斜、推覆体和断块背斜构造;盐层表现为盐枕构造、盐缩颈形成的鱼尾构造和岩盐塑性流动构造;盐下层则表现为受复杂基底断裂控制的叠瓦冲断和背冲断块构造。寒武系膏盐岩为震旦系—下寒武统目的层系的油气聚集提供了优质的封盖条件;同时,膏盐岩自身参与的 TSR 反应(硫酸盐热化学还原反应)和表生溶蚀也可以有效地改善储层的储集物性。更重要是,寒武系膏盐岩作为区域滑脱层对盐上和盐下震旦系—下古生界构造变形起着重要控制作用,形成一系列含油气构造圈闭。从盐相关构造的发育特点来看,鄂西—渝东区的盐下断背斜和川东南地区的盐上断背斜是有利的勘探目标。

关键词:盐相关构造;膏盐岩;控油气作用;勘探目标;寒武系;四川盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Salt-related structure and its control on hydrocarbon
of the Cambrian in Sichuan BasinLi Shuangjian^{1,2}, Sun Dongsheng¹, Zheng Menglin¹, Meng Xianwu³

(1. Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 2. Structural Geology and Reservoir Laboratory, SINOPEC, Beijing 100083, China; 3. Southwest Oil and Gas Field Company, SINOPEC, Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract: Gypsolyte-salt layers of the Middle-Lower Cambrian are widely developed in the southern and eastern Sichuan Basin, resulting in a variety of salt-related structures. Analyses of outcrop, drilling and seismic data reveal that the gypsolyte-salt layers of the Cambrian in Sichuan Basin formed on restricted intra-craton platform and has the characteristics of old age, deep burial depth, uneven thickness, more gypsolyte and less salt, and various associated rock types. The gypsolyte-salt related structures show obvious layering due to the differential gypsolyte and salt mobility, tectonic compression, basement faults, and detachment. The post-salt structures are mainly anticlines, thrust nappes and faulted-anticlines. The structures within the salt layers are mainly salt pillows, tail structures and plastic flow structures. The presalt structures mainly include imbricate thrusts and pop-up structures controlled by the complex basement faults. The gypsolyte-salt layers of the Cambrian provide good sealing conditions for hydrocarbon accumulation in the Lower Sinian-Lower Cambrian. Meanwhile, they also can improve reservoir quality through TSR and supergene dissolution that they are involved. Even more important, as a region detachment layer, the gypsolyte-salt rock plays an important role in the structural deformation of the post-salt and pre-salt Sinian-Lower Paleozoic, resulting in a series of hydrocarbon traps. According to the characteristics of gypsolyte-salt related structures, the pre-salt faulted anticlines in western Hubei-eastern Chongqing and post-salt faulted anticlines in southeast Sichuan are the favorable exploration targets.

Key words: salt-related structure, gypsolyte-salt rock, control on hydrocarbon, exploration target, Cambrian, Sichuan Basin

盐构造广泛分布于北美、非洲、欧洲、东南亚、中东、中亚等地区的含油气盆地中^[1-2],盐相关构造的勘探发现是当今重要的油气储量增长点。2000—2012

年,常规油气新增储量主要在巴西、澳大利亚、西非与墨西哥湾四大深水区,除澳大利亚外,其他地区均发育大规模的盐构造。我国的一些大型含油气盆地,如塔

收稿日期:2014-02-14;修订日期:2014-08-01。

第一作者简介:李双建(1978—),男,博士、高级工程师,含油气盆地分析。E-mail:lishuangjian_syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05005-001);国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2012CB412800);国家自然科学基金项目(40739904)。

里木、四川、江汉和渤海湾盆地等也广泛发育多期盐岩层系和多种类型的盐构造,在盐相关构造领域也发现了多个大、中型油气田^[3-7]。关于盐相关构造的变形样式、变形机理及其控油气作用研究是当前国内外构造地质研究的热点^[6-11],

四川盆地发育中-下三叠统和中-下寒武统两套区域性膏盐岩。由于沉积厚度大、埋藏浅、构造样式多样,前人对龙门山、米仓山、大巴山山前带的中、下三叠统海相碳酸盐岩层系中的盐相关构造研究相对较多^[12-16];而由于埋藏深、钻井揭示少,对四川盆地内部中、下寒武统膏盐岩相关构造则缺乏系统的研究。最新钻井和地震资料证实,川东地区深层发育了很多与中、下寒武统膏盐岩相关的构造。这些盐构造对盐上和盐下构造形态的控制作用明显,是寻找油气勘探目标的重要方向。

与国内外典型的盐相关构造相比,四川盆地寒武系盐相关构造具有鲜明的特点。典型的盐构造发育区,主要发育于被动大陆边缘的伸展区和前陆盆地的挤压区,如大西洋两岸的被动陆缘和中东的扎格罗斯山前带等;而四川盆地寒武系主要发育在稳定的克拉通盆地内部。世界范围内,典型的盐构造发育区的膏盐岩厚度一般都超过100 m,有些地区甚至可以超过1 000 m,如西非被动陆缘的安哥拉盆地在塑性层聚集带的厚度一般为300~1 200 m,盐底辟的最大高度可达2 500 m^[17];库车坳陷古近纪-新近纪膏盐岩构造加厚部位,厚度可达2 000余米^[9]。四川盆地中、下三叠统膏盐岩在川北和川西的山前带厚度也普遍超过200 m^[16];而四川盆地寒武系膏盐岩连续沉积厚度较薄,单层连续沉积厚度最大不超过200 m,普遍小于50 m,加上膏盐岩层埋藏深、变形晚等特点,对其盐相关构造变形样式和变形机理的解剖具有重要的科学意义。

本文通过对地震剖面的解释和钻井资料的分析,从岩相古地理背景入手,结合典型钻井膏盐岩层的岩性组合特征,刻画了四川盆地寒武系膏盐岩发育与分布特征;选择不同构造部位和变形强度的地震剖面,系统总结了寒武系膏盐岩盐构造变形样式;从独特的膏盐岩层发育特征和构造环境入手,探讨了盐相关构造的变形机理;结合典型钻井的油气显示,明确了盐相关构造在油气保存、储层改造和油气聚集3个方面对油气的控制作用。

1 四川盆地寒武系膏盐岩层发育与展布特征

1.1 古地理背景

四川盆地及周缘寒武系蒸发岩形成于克拉通内伸展环境中,主要受控于干旱炎热气候条件和相对封闭

的古地理背景。早、中寒武世,上扬子台地西侧为康滇古陆,南侧为牛首山古陆,北为汉中古陆,东南方有江南雪峰相对隆起的碎屑浅滩带作为屏障,其间是广阔的台盆海域,具有一定的封闭性,有利于蒸发作用进行。从沉积序列上看,寒武纪地层在总体上反映了一个海退序列,在早寒武世晚期之后,海水渐向东北方向退出,在川南—川东南—鄂西形成局限海盆和萨布哈—潟湖沉积环境,发育广泛的蒸发岩沉积^[18-21]。

1.2 膏盐岩层展布特征

四川盆地寒武纪有两个成盐期,即早寒武世龙王庙期和中寒武世毛庄—张夏期,受控于西面的川中隆起、南面的黔中隆起和东南方向缓坡浅滩的封闭作用,形成永川—江津和石柱—利川两个含盐中心(图1)。中、下寒武统石膏、石盐和盐泉等分布较为广泛,主要分布于川东南、滇东北、川东北、黔西北和鄂西北等地。在川东南地区含盐层位主要是下寒武统清虚洞组,川东北地区含盐层位主要是中寒武统覃家庙组。上寒武统娄山关群膏盐岩分布范围相对较小。从空间展布分析,该区寒武系含盐岩层位从川东南—黔西北向川东北—鄂西北(建南地区)渐新,含盐岩层位有从下寒武统清虚洞组向中寒武统覃家庙组变化的趋势。

早寒武世清虚洞组为一套海相碳酸盐岩地层,为白云质灰岩、白云岩夹灰岩,部分地区下部夹有一定数量的砂、页岩,横向变化较大。在川东、川东南井下可见含膏白云岩及白云质石膏等膏盐岩,膏盐岩在各井分布层数从1层到30层不等,膏盐岩总厚度从几米到几十米不等,与膏盐岩伴生的岩石类型主要为灰色、深灰色含泥灰岩。在江津、泸州、永川、邻水等地钻孔内

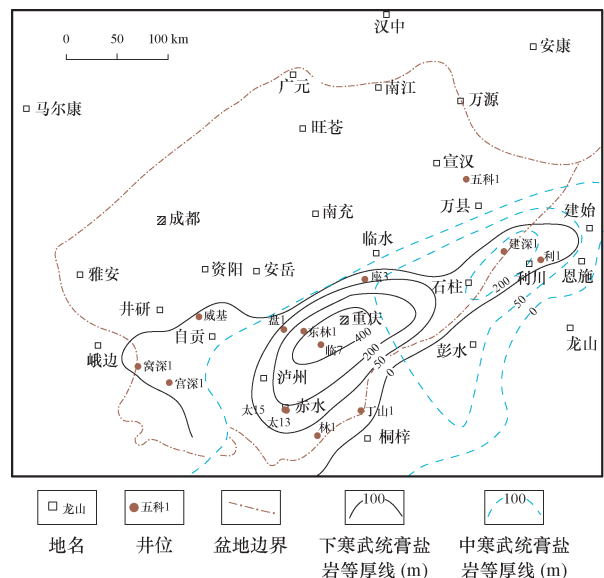


图1 四川盆地寒武系膏盐岩厚度分布

Fig. 1 Isopach map of gypsolyte-salt layers in the Cambrian of Sichuan Basin

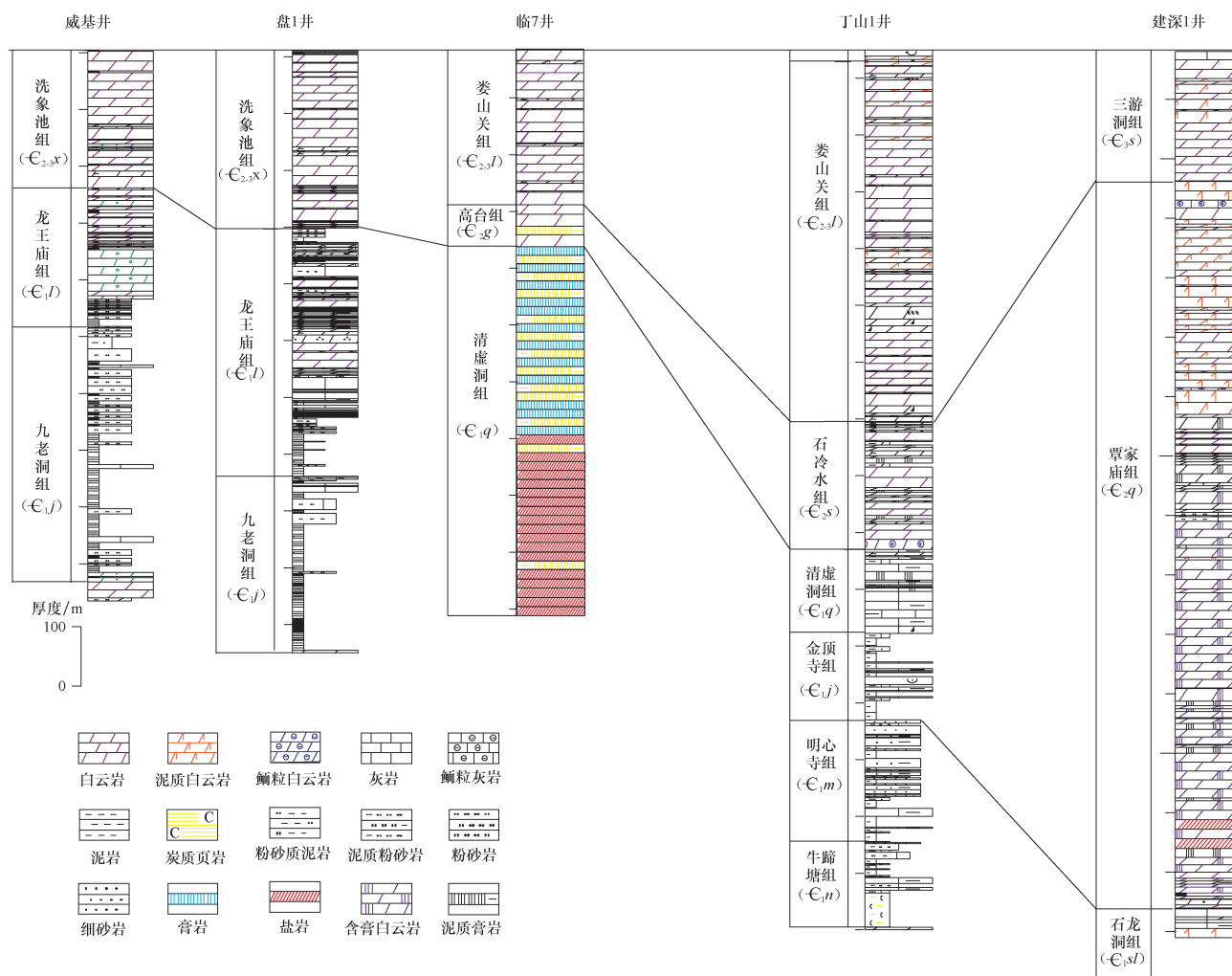


图2 四川盆地典型钻井膏盐岩纵向分布特征

Fig. 2 Vertical distribution of gypsolyte-salt layers in typical wells of Sichuan Basin

见有石盐层,以临7井的石盐层发育厚度最大,累计厚度超过200 m(图2)。中寒武世覃家庙组岩性为白云岩、白云质灰岩夹膏盐岩,部分地区下部为页岩、粉砂岩。在川东及川东北井下可见含膏白云岩及白云质石膏膏盐岩,层数各井不尽相同,最少仅2层,最多可达40层,膏盐岩总厚度为几米到几百米不等。利1井、鱼1井与池7井均未见石盐,仅见石膏;仅有建深1井钻遇石盐层。覃家庙组中、上部见有巨厚含膏盐岩的致密白云岩与膏盐岩互层现象,膏盐岩累计厚度达622.5 m,其中含膏盐岩、膏质盐岩和石盐岩累计厚度达167.5 m(图2)。

由此可见,四川盆地寒武系膏盐岩具有分布广、厚度变化大、单层厚度小、夹层多、膏岩多、盐岩少、伴生岩石岩性组合多样的特点,与世界上多数典型的含盐盆地相比,有鲜明的特色。

2 四川盆地寒武系膏盐岩相关构造变形样式

四川盆地寒武系膏盐岩主要分布在川东和川东南

地区。从地表变形来看,该区主要发育北东向紧闭的高陡背斜,川东南赤水地区叠加了东西向紧闭褶皱(图3)。从大量年代学研究来看,这些高陡背斜主体形成于燕山晚期,喜马拉雅期得到了不同程度的强化^[22-27]。从地震剖面上看,该区寒武纪地层埋藏深度普遍在5 000~6 000 m。受寒武系、志留系和三叠系滑脱层的联合影响,该区构造变形在纵向上分层明显。与寒武系膏盐岩相关的构造变形主要发生在深部,影响的地层包括震旦系、寒武系和奥陶系。

四川盆地寒武系膏盐岩层系相关的盐上层、盐层和盐下层变形样式有明显的差异。盐上层表现为背斜、推覆体和断层相关褶皱样式;盐层表现为盐枕构造、盐推覆构造和盐缩颈形成的鱼尾构造;盐下层则表现为受复杂基底断裂控制的背冲断块构造或叠瓦冲断构造。盆地腹部,上覆地层较厚,基底断裂不发育,发育膏盐岩的滑脱断层,主要盐构造样式有盐枕构造、断层相关褶皱、盐上高陡背斜等;靠近盆地边缘的地区,发育基底断裂,这些断裂或者切穿膏盐层或者在膏盐层中顺层滑脱,形成盐下断层相关褶皱、叠瓦状冲断褶皱组合和盐断块等构造样式。

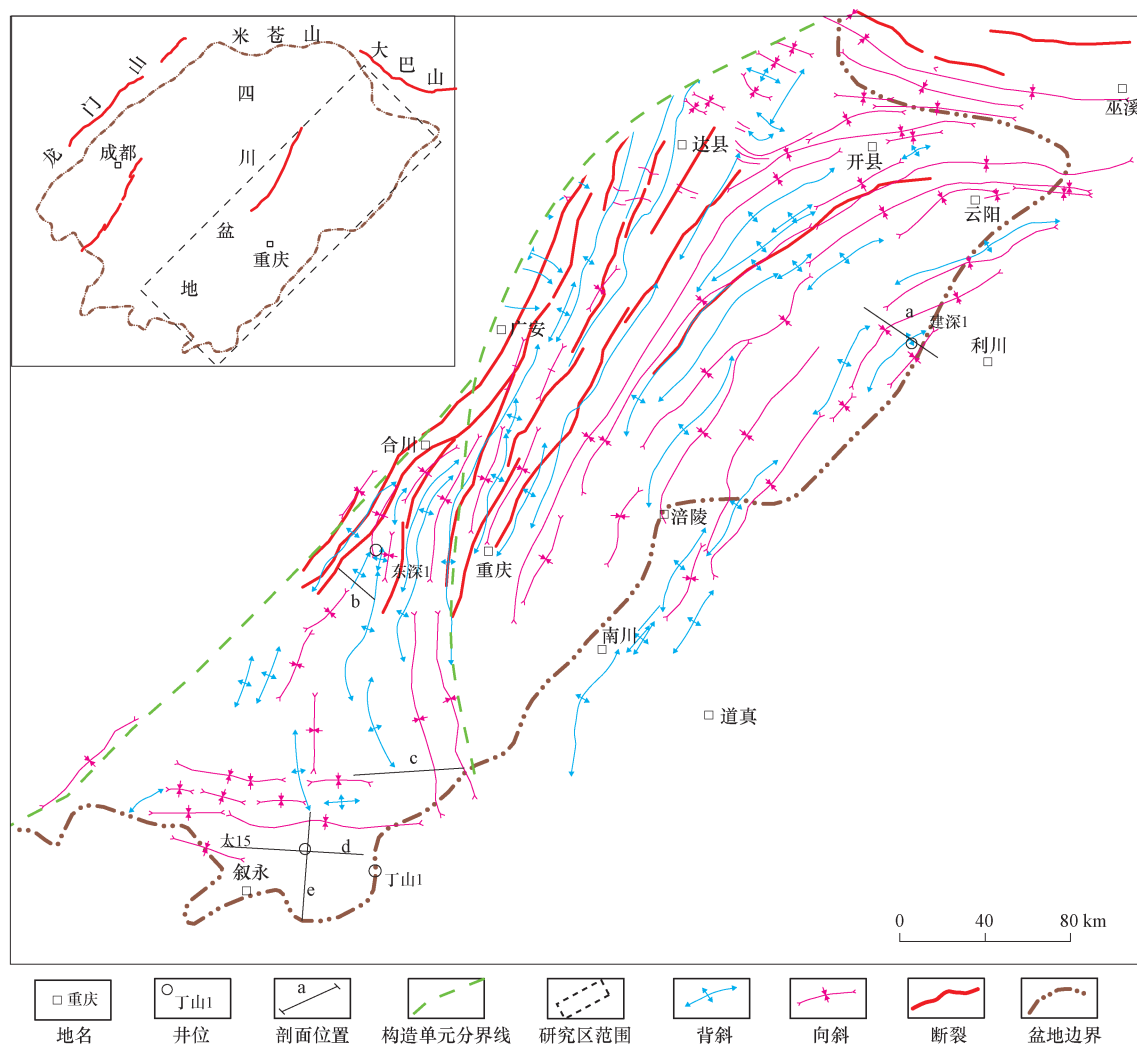


图3 四川盆地东部构造纲要与地震剖面位置

Fig. 3 Structure outline map and location of seismic sections, eastern Sichuan Basin

2.1 膏盐岩构造样式

1) 盐枕构造

盐枕构造主要发育在盆地内部埋藏较深且挤压作用较弱的地区,如在川东南赤水地区的太和-旺隆构造,在横跨该构造的东西向剖面上,可见典型的盐枕构造,呈底平上凸的不规则三角形,其高度与宽度之比约为1:5(图4)。盐枕主要发育在盐构造演化的初期阶段,由于没有充足盐岩供应,并没发育成底辟构造。

2) 盐断块构造

盐断块构造主要发育在盆地边缘埋藏相对较浅且挤压作用较强的地区,如鄂西-渝东南建南地区,在过建深1井地震剖面上,可以见到由于基底断裂和强烈挤压膏盐层加厚形成的盐断块构造。建南构造主断裂发源于基底、消失在中三叠统膏盐岩中,建南构造为该断裂活动形成的断层相关褶皱背斜;而与主断裂同期形成的叠瓦状次级断层,都消失在寒武系膏盐岩中,盐断块背斜就形成在这些断层及与其伴生的反冲断层之间(图5)。

3) 盐缩颈形成的鱼尾构造

由于膏盐岩的流动,在强挤压部位聚集形成盐枕、盐丘;而在这些构造的边缘部位,由于盐缩颈形成了鱼尾构造。在过建深1井的剖面上可以见到鱼尾构造(图5)。盐聚集形成的盐丘和盐背斜会给钻井工程造成不利影响,建深1井即是由于厚层盐岩的存在,导致事故完钻;而鱼尾构造部位由于膏岩厚度较薄,恰恰是容易达到钻探目标的地区。

2.2 膏盐上构造样式

1) 盐上背斜

盐上背斜主要发育在盐枕构造上方,构造形态与盐枕构造相似。受多期、多方向构造挤压的影响,川东南赤水地区盐上背斜构造往往成带分布,盐上背斜与向斜相间发育(图4),背斜核部膏盐岩聚集,向斜核部膏盐岩流失。如果发育通源断裂,盐上背斜是一种十分有利的油气聚集构造。

2) 盐滑脱断层-相关褶皱及断块背斜

该构造样式主要发育在与膏盐岩滑脱断层相关的

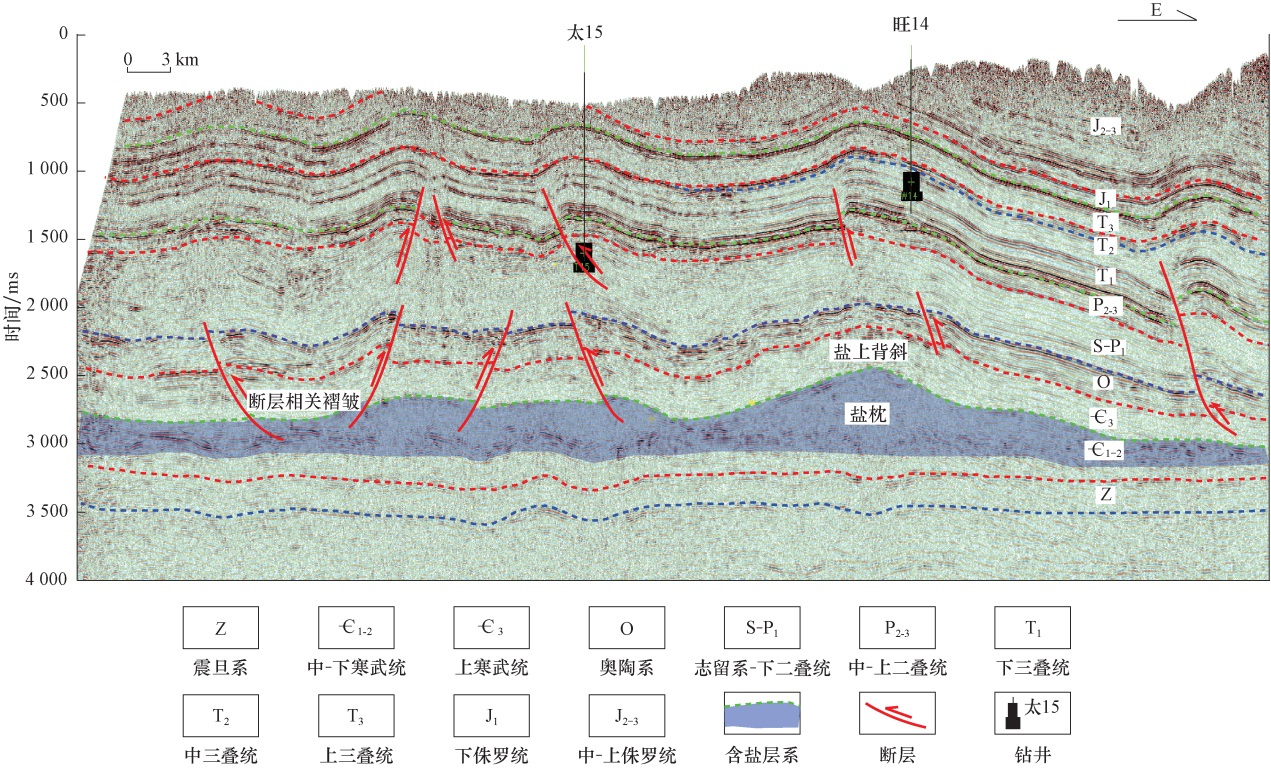


图4 四川盆地东部寒武系盐枕和盐上背斜构造

Fig. 4 Salt pillow and post-salt anticline structures in the Cambrian, eastern Sichuan Basin
(据 CDNCS-06-79 地震剖面解释, 剖面位置见图3中的 d。)

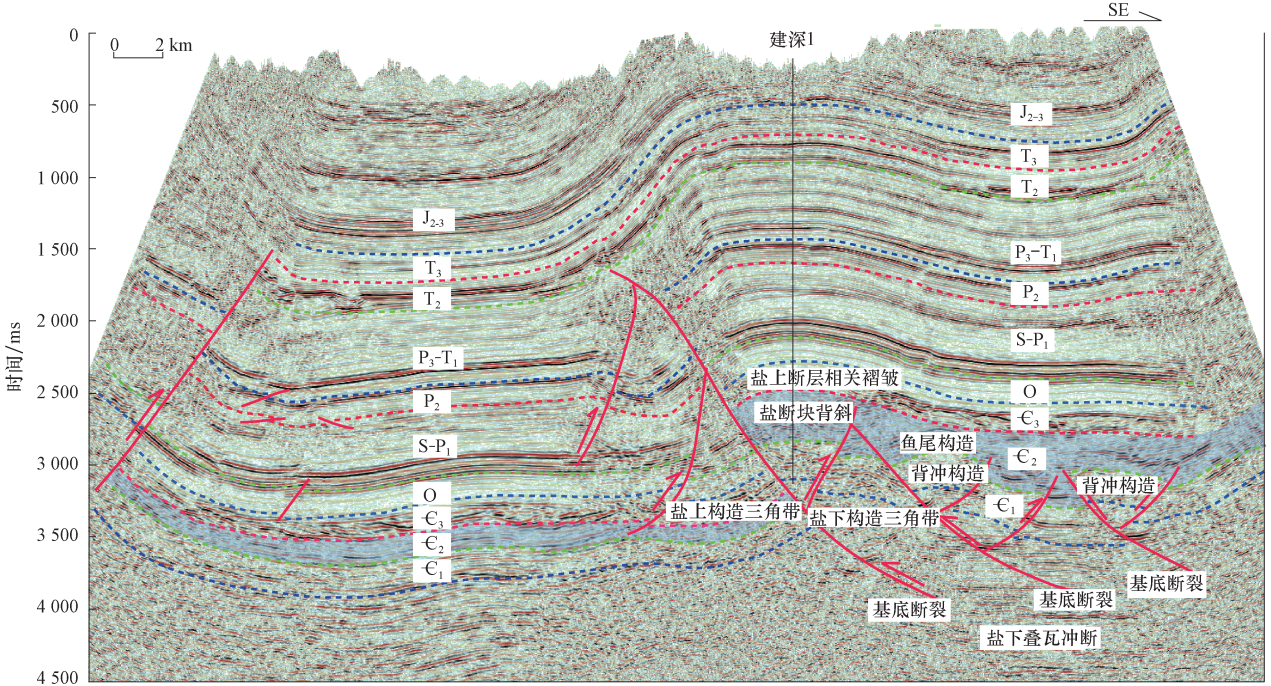


图5 四川盆地东部寒武系盐断块背斜和盐下叠瓦冲断构造

Fig. 5 Salt fault-block anticline and pre-salt imbricate thrust structures in the Cambrian, eastern Sichuan Basin
(据 JN3Dline1196 地震剖面解释, 剖面位置见图3中的 a。图例同图4。)

褶皱翼部,在顺膏盐层发育的滑脱断层与和其伴生的反冲断层之间形成断块背斜;不发育反冲断层的地带,在断层的坡-坪部位形成断弯背斜,如永川地区(图6)。这些断块背斜主要发育在寒武系和奥陶系中,

上覆岩层受厚层志留系泥岩滑脱层的影响,往往发育与下部不同样式的构造。

3) 盐上叠瓦冲断

在挤压作用比较强烈的地区,往往发育一系列沿膏

盐岩滑脱断层形成的断弯褶皱,形成一个叠瓦冲断块体。断块主体由寒武系和奥陶系组成,与志留系及上覆地层属于受不同滑脱层控制的不同构造变形体系。这种构造样式组合在川东南和川东线性背斜深层普遍都有发育(图6—图8)。

2.3 膏盐下构造样式

该构造样式主要是盐下基底断层相关褶皱及断块背斜,主要分布在基底滑脱断层比较发育的地区。在基底

滑脱层和膏盐岩层之间的地层,在主滑脱层和反冲断层之间形成断块背斜;在反冲断层不发育的部位,形成断弯褶皱背斜。这种构造样式组合在挤压作用强烈的鄂西—渝东(图5)和川东南綦江地区东南缘(图7)都有发育。

3 四川盆地寒武系膏盐岩构造变形机理

盐流动和盐构造的形成机理有6种情况,即浮力

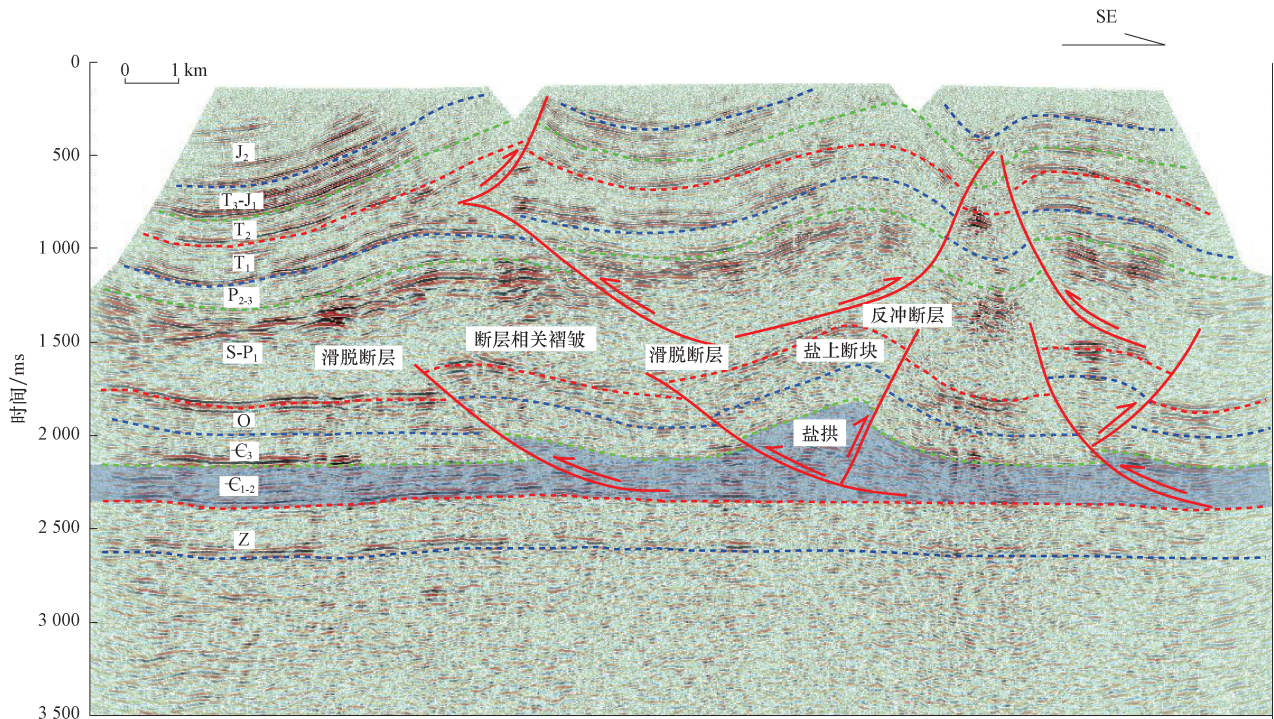


图6 四川盆地东部寒武系盐拱及盐上断块背斜构造

Fig. 6 Salt arch and post-salt fault-block anticline structures in the Cambrian, eastern Sichuan Basin
(据 YC-NW-06-68 地震剖面解释,剖面位置见图3中的b。图例同图4。)

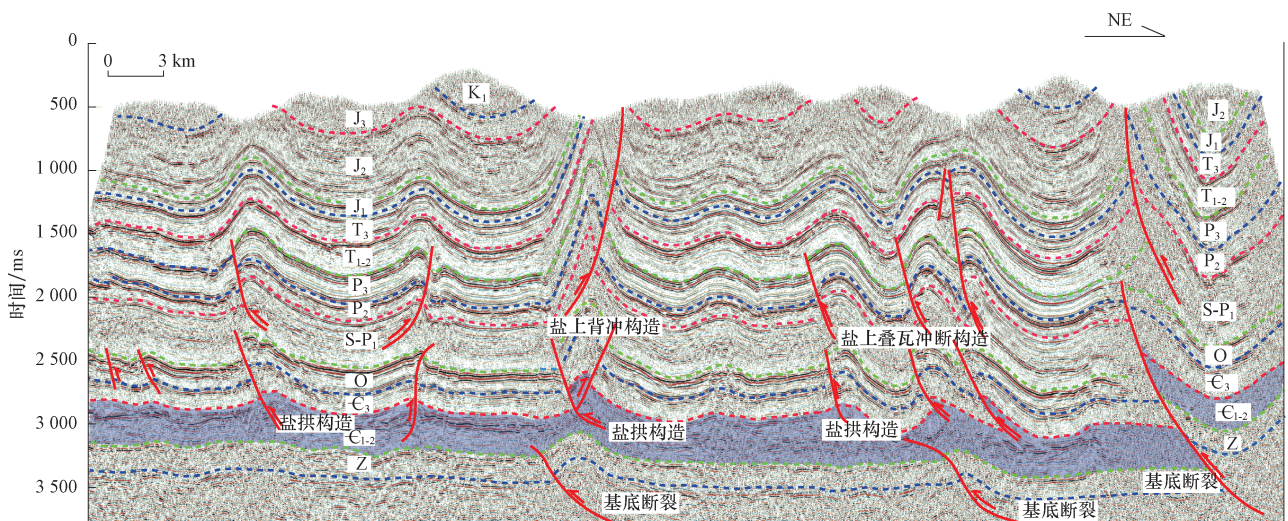


图7 四川盆地东部寒武系盐上冲断褶皱和盐上背冲构造

Fig. 7 Post-salt thrust fold and pop-up structures in the Cambrian, eastern Sichuan Basin
(据 QJ-NE-02-20 地震剖面解释,剖面位置见图3中的c。图例同图4。)

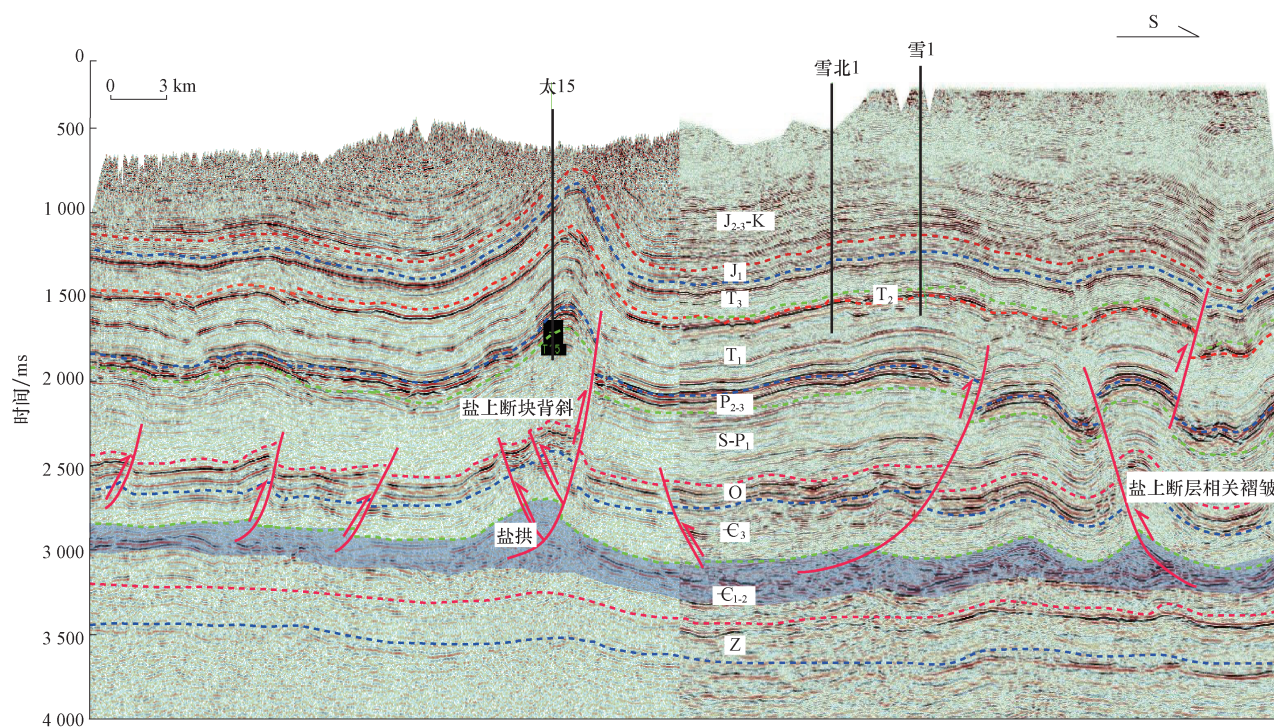


图8 四川盆地东部寒武系盐拱与盐上断层相关褶皱构造

Fig. 8 Salt arch and post-salt fault-related fold structures in the Cambrian, eastern Sichuan Basin

(据 CNDCS-06-74.5 地震剖面解释,剖面位置见图3中的e。图例同图4。)

作用、差异负荷、重力扩张作用、热对流作用、挤压作用和伸展作用^[28]。由于四川盆地寒武系膏盐岩具有厚度小、岩性非均质性强、埋藏深并且远离碰撞缝合带等特点,由此造成盐构造的变形差异性很强、变形强度较低。这些盐相关构造变形机理也具有鲜明的特色,总结起来,主要受膏岩和盐岩流动性差异、构造挤压、基底断裂和断裂滑脱作用等因素控制。

3.1 膏岩和盐岩流动性的差异

虽然膏岩和盐岩经常伴生,但是两者的岩石力学性质差异很大,石盐比硬石膏的塑性流动性强得多。石盐的主要成分是 NaCl 和 KCl。石膏的主要成分则是 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;石膏从 80 °C 开始脱水,到 120 °C 时,脱去原结晶水的 3/4,这时它便成为半水石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$);当温度继续升高到 150 °C 时,半水石膏中的水全部脱去之后,它便蜕化成为硬石膏(CaSO_4)^[29]。四川盆地寒武系在历史时期最大埋深普遍超过了 6 000 m,基本上都经历了 150 °C 以上的高温,所以寒武系石膏均已转化为硬石膏。岩石力学实验表明,不含石盐的硬石膏岩具有明显的脆性变形特征,而石盐含量较高的膏盐岩则有明显的塑性变形特征(图9)。四川盆地寒武系膏盐岩的沉积,具有膏多盐少、岩性不均一的特点,由于膏岩和盐岩流动性具有明显差异,造成盐岩沉积中心盐构造比较发育,如川东南赤水—泸州—盐津和川东北石柱—建南地区;而盐岩发育较薄

的地区,尽管有膏岩的发育,但膏盐构造并不发育,如川东南盆地边缘的丁山1井,寒武系有近 20 m 的连续硬石膏岩发育,但地震剖面和岩心上未发现任何岩层流动蠕变的特征。

盐岩具有的一个特点是不可压缩性,随着埋深的增加,盐岩密度一般不发生变化,导致盐岩的密度一般都小于上覆的碳酸盐岩和碎屑岩,从而有利于形成密度反转,产生浮力作用,促进盐岩发生塑性流动,形成多种样式的盐相关构造。但是,由于四川盆地寒武系膏盐岩厚度不均一、岩性不均一,强流动性的盐岩厚度较薄,所以由于上覆层系的重力作用引起的盐岩流动规模较小,盐相关构造的样式相对单一,盐岩强烈流动形成的盐刺穿、盐底辟、盐株、盐墙等构造较少见,常见的是盐岩弱流动形成的盐枕、盐丘以及与发育于膏盐岩层的滑脱断层相关褶皱组合形成的构造样式。

3.2 膏盐岩层的挤压缩短作用

寒武系膏盐岩沉积之后,四川盆地经历了多期的构造运动变动,主体以强挤压、弱伸展为特点。特别是燕山期以来,来自东南方向持续的挤压应力,造成四川盆地东缘强烈褶皱变形,湘鄂西地区褶皱回返,形成广泛下古生界暴露,川东地区则形成一系列的北东向高陡背斜带^[25]。从变形卷入的地层来看,川东地区膏盐相关构造与高陡背斜的形成时间相同,属于同一期变形。受包括寒武系膏盐岩在内的多层滑脱层发育

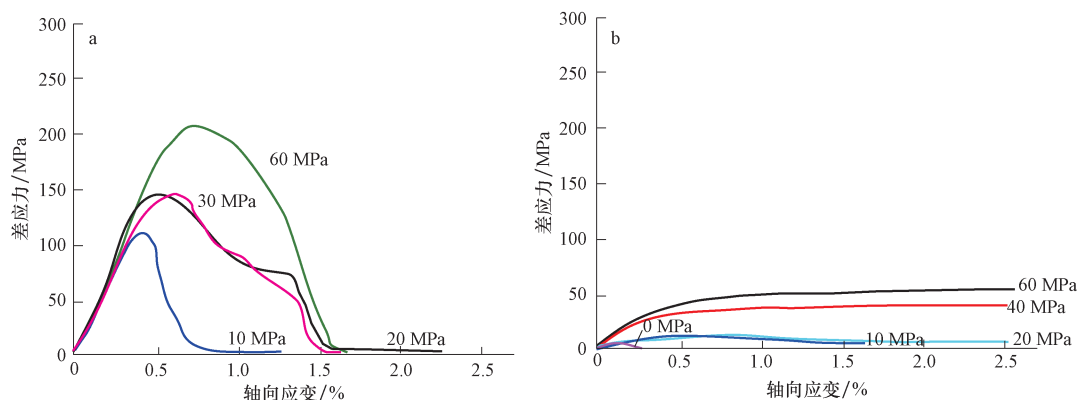


图9 典型硬石膏岩和膏盐岩三轴岩石力学应变曲线

Fig. 9 Triaxial rock mechanics strain curves of typical anhydrite and gypsum-salt rock

a. 样品的硬石膏含量为95%,白云石含量为5%;b. 样品的石盐含量为60%,石膏含量为40%

的控制,多数地区呈现出上、中、下3层变形结构。在靠近湘鄂西地区的东南缘,由于挤压作用更为强烈,造成发源于板溪群基底的滑脱断层形成,并向盆地内扩展,形成一系列的盐下构造。寒武系膏盐岩由于具有较高的塑性,受挤压缩短作用影响也最大,形成盐枕、盐拱等构造。膏盐岩盐上地层的变形除了受盐构造的影响之外,同时受厚层志留系滑脱层控制,与志留系之上的地层变形具有明显差异。

3.3 膏盐岩层的断裂滑脱作用

膏盐岩不仅仅具有较强的塑性,可以局部聚集形成盐构造,同时由于其岩性较软,盐上和盐下的断层均在膏盐层中滑脱消失。这种滑脱作用虽然没有造成明显的地层变形,却有效地调节了构造变形样式。这种膏盐岩的断裂滑脱作用,可以在盐上层系中形成盐上背斜、断层相关褶皱等盐相关构造(图6—图8),也可以在盐下层系中形成盐下断块背斜和断层相关褶皱(图5)。在一些地区,由于膏盐岩对构造应力的消减和吸收,造成盐下构造变形较弱或不发育构造变形(图4,图8)。

4 四川盆地寒武系膏盐岩层及相关构造的控油气作用

4.1 油气保存作用

膏盐岩是天然的优质盖层,这主要是因为其矿物组成和排列决定了它具有极低的孔隙度、渗透率和很强的塑性及流动性,而且这些性能几乎不受成岩演化的影响。单纯的以盖层来讲,稳定、连续分布的膏盐岩,在厚度不大的情况下即可形成有效的封闭。美国的 Little Sand Draw 油田,膏盐岩盖层厚度仅 1.2 m。全球范围内以膏盐岩为直接盖层的大型气田中,膏盐岩盖层厚度小于 20 m 的占 41.3%,20 ~ 100 m 的占

38.7%,大于 100 m 的占 20%^[5,30]。四川盆地寒武系膏盐岩在川东地区连片分布,中生界覆盖区厚度大于 20 m 的分布范围大约为 $6 \times 10^4 \text{ km}^2$,这些地区的寒武系盐下都具有良好的盖层封盖条件。

通过对川东南丁山 1 井储层沥青分布和含油气包裹体丰度(*GOI*)分析,证实了薄层膏盐岩在油气藏形成过程中对流体的封隔作用。尽管丁山 1 井寒武系膏盐岩连续厚度仅为 20 m,但是膏盐岩上、下储层沥青的面孔率和 *GOI* 值相差甚远。在盐下,灯影组四段和二段,储层沥青的面孔率可达 8% ~ 9%;下寒武统清虚洞组白云岩晶间孔中沥青的含量也可达到 2%,属于沥青化的古油藏^[31]。而盐上的上寒武统娄山关组尽管粉晶白云岩和亮晶砂屑白云岩基质孔隙度可达 2.8% ~ 4.5%,但未见到任何储层沥青的痕迹^[31-33]。储层中 *GOI* 值,在灯影组灯四段可达 100%,而在膏盐岩层段仅为 0.2%。由此可见,膏盐岩在丁山构造油气成藏过程中,起到了重要的盖层封隔作用。

4.2 改善储层作用

膏盐岩本身的储集性能较弱,但是与膏盐岩相关的溶蚀作用和膏盐岩流动作用产生的微裂缝能有效地改善储层。

寒武系储层发育段的原始沉积环境主要为潮坪沉积,其中可以见到成层的膏盐,也可以见到顺层发育的晶孔与晶洞。从残余结构来看,这些孔洞是原来的膏盐溶蚀后留下的^[30],溶蚀孔洞型储层在膏盐盆地边缘地区广泛存在。另外,硫酸盐热化学还原反应(TSR)可能是深层优质碳酸盐岩储层形成的重要机制,四川盆地深层碳酸盐岩优质储层(如普光气田)的形成受 TSR 的影响很大^[34-36],威远气田的寒武系洗象池组气藏也已经被证实存在 TSR 反应对储层的改造^[37]。整个川东地区中、下寒武统储层普遍夹有石膏层、紧邻下寒武统烃源岩层,并且最大埋深普遍超过 6 000 m,古

地温普遍超过 120 ℃,这些都表明寒武系储层具有 TSR 反应所发生的基本条件;特别是原始孔隙度较高的台内滩储层发育区,是有利于 TSR 反应形成优质储层的地区。

受燕山期以来的强烈挤压作用影响,川东地区寒武系盐上形成了一系列紧闭的高陡背斜。随着挤压作用的增强,在背斜核部能干层中会形成一些开启的断裂和裂缝,这些裂缝可能会成为油气有利的储集空间,也可能造成油气向上运移。已有的钻井,如川东南的太 13 井和东深 1 井,均在盐上背斜发育裂缝性储层。太 13 井在志留系韩家店组砂岩、灰岩累计井喷耗气、采气 $164.88 \times 10^4 \text{ m}^3$;东深 1 井钻进奥陶系宝塔组时强烈井喷,完井测试获气 $25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[38]。从地质条件上讲,整个川东地区夹在寒武系膏盐岩和志留系厚层泥岩两套滑脱层之间的强变形区都可能发育裂缝型气藏。

4.3 油气运移与聚集

由于膏盐岩的运动,形成了各种盐相关构造(如盐丘),为油气聚集提供了场所;同时,在薄层盐岩地区,盐岩的蠕变作用会形成一些塑性断层,这些断层切断盐岩层,形成盐岩缺失区,即“盐天窗”。“盐天窗”的形成成为下部烃源岩中的油气经过盐岩区域性盖层向上部地层聚集成藏提供了通道。在墨西哥湾、北海、中亚等地均有烃类气体沿盐丘顶部的断裂泄漏的现象^[39-40],这些现象反映了盐构造活动与烃类的运移和聚集有着密切的关系。鄂西-渝东地区寒武系膏盐岩盐下构造发育,断层直接沟通了烃源岩与储层,同时膏盐岩保持了完整性,所以这些构造具有良好的勘探前景。川东南地区寒武系盐上构造发育,而且具有通源断裂断穿膏盐岩层,上覆志留系盖层可以形成良好的封盖,因而寻找盐上有利的构造目标是该区勘探值得重视的地方。

5 结论

1) 四川盆地寒武系膏盐岩形成于克拉通内局限台地环境,具有时代老、埋藏深、厚度分布不均、膏多盐少、伴生岩石类型多样等特点,这些特点决定了与膏盐岩相关的构造变形与油气成藏条件具有鲜明的特色。

2) 膏岩和盐岩流动性差异、构造挤压、基底断裂和断裂滑脱作用等多种因素影响,四川盆地寒武系膏盐岩层系相关的盐上层、盐层和盐下层变形样式有着明显的差异。盐上层表现为背斜、推覆体和断层相关褶皱模式;盐层表现为盐枕构造、盐推覆构造、盐缩颈形成的鱼尾构造和盐岩塑性流动构造;盐下层则表现

为受复杂基底断裂控制的背冲断块构造。

3) 寒武系膏盐岩为震旦系-寒武系目的层系的油气聚集提供了优质的封盖条件;同时,膏盐岩自身参与的 TSR 反应和表生溶蚀也可以有效地改善储层的储集物性。更重要是,膏盐岩作为区域滑脱层对盐上和盐下震旦系-下古生界构造变形起着重要控制作用,形成一系列含油气圈闭构造。从盐相关构造的发育特点来看,鄂西-渝东区的盐下断背斜和川东南赤水地区的盐上断背斜是有利的勘探目标。

参 考 文 献

- [1] 贾承造,赵文智,魏国齐,等. 盐构造与油气勘探[J]. 石油勘探与开发,2003,30(2):17-19.
Jia Chengzao, Zhao Wenzhi, Wei Guoqi, et al. Salt structures and exploration of oil and gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003,30(2):17-19.
- [2] 余一欣,周心怀,彭文绪,等. 盐构造研究进展述评[J]. 大地构造与成矿,2011,35(2):169-182.
Yu Yixin, Zhou Xinhui, Peng Wenxun, et al. An overview on salt structures[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2011,35(2):169-182.
- [3] 陈书平,汤良杰,漆家福,等. 盐在变形中的作用:库车坳陷与东濮坳陷盐构造对比研究[J]. 地质学报,2007,81(6):745-756.
Chen Shuping, Tang Liangjie, Qi Jiafu, et al. Roles of salt in deformation: compression of the salt-related structures between Kuqa depression and Dongpu depression[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(6):745-756.
- [4] 戈红星. 文留盐构造成因与掩埋机制[J]. 石油学报,1997,18(2):35-40.
Ge Hongxing. Structural evolution of Wenliu salt diaper and garben, Bohai bay[J]. Acta Petrolei Sinica, 1997,18(2):35-40.
- [5] 金之钧,周雁,云金表,等. 我国海相地层膏盐岩盖层分布与近期油气勘探方向[J]. 石油与天然气地质. 2010,31(6):715-724.
Jin Zhijun, Zhou Yan, Yun Jinbiao, et al. Distribution of gypsum-salt cap rocks and near-term hydrocarbon exploration targets in the marine sequences of China[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6):715-724.
- [6] Adam J, Ge Z, Sanchez M. Salt-structural styles and kinematic evolution of the Jequitinhonha deepwater fold belt, central Brazil passive margin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2012,37(1):101-120.
- [7] Coward M, Stewart S. Salt-influenced structures in the Mesozoic-Tertiary cover of the southern North Sea, UK[C]// Jackson M P A, Roberts D G, Snelson S. Salt tectonics: a global perspective. AAPG Memoir 65, 1995:229-250.
- [8] 汤良杰,黄太柱,邱海峻,等. 塔里木盆地中央隆起带中、西段及邻区中、下寒武统盐相关构造及其变形机理[J]. 中国科学:地球科学,2013,43(1):33-43.
Tang L J, Huang T Z, Qiu H J, et al. Salt-related structure and deformation mechanism of the Middle-Lower Cambrian in the middle-west parts of the Central Uplift and adjacent areas of the Tarim Basin[J]. Science Sinica(Terrae), 2013,43(1):33-43.
- [9] 汤良杰,贾承造,皮学军,等. 库车前陆褶皱带盐相关构造样式[J]. 中国科学(D辑:地球科学),2003,33(1):38-46.
Tang Liangjie, Jia Chengzao, Pi Xuejun, et al. Salt-related structure style in Kuqa foreland fold belt[J]. Science in China: (Series D:

- Earth Sciences), 2003, 33(1): 38–46.
- [10] Hudec M R, Jackson M P A. Terrain firma: understanding salt tectonics [J]. *Earth-Science Reviews*, 2007, 82(1–2): 1–28.
- [11] 徐磊, 操应长, 王艳忠, 等. 东营凹陷古近系膏盐岩成因模式及其与油气藏的关系[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2008, 32(3): 30–35.
- Xu Lei, Cao Yingchang, Wang Yanzhong, et al. Genetic models of salt-gypsum rock of Paleogene in Dongying Depression and its relationship with hydrocarbon reservoir [J]. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition)*, 2008, 32(3): 30–35.
- [12] 汤良杰, 郭彤楼, 余一欣, 等. 四川盆地东北部前陆褶皱—冲断带盐相关构造[J]. *地质学报*, 2007, 81(8): 1048–1056.
- Tang Liangjie, Guo Tonglou, Yu Yixin, et al. Salt-related structures in the foreland fold-thrust belt of northeastern Sichuan basin, South China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(8): 1048–1056.
- [13] 汤良杰, 杨克明, 金文正, 等. 龙门山冲断带多层次滑脱带与滑脱构造变形[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2008, 38(增刊 I): 30–40.
- Tang Liangjie, Yang Keming, Jin Wenzheng, et al. Multi-level decollement zones and detachment deformation of Longmenshan thrust belt, Sichuan Basin, southwest China [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2008, 38(S1): 30–40.
- [14] Jia D, Wei G Q, Chen Z X, et al. Longmen Shan foldthrust belt and its relation to the western Sichuan Basin in central China: new insights from hydrocarbon exploration [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(9): 1425–1447.
- [15] 李辛子, 刘彬, 武晓玲, 等. 通南巴地区膏盐层分布及其流变学特征[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(4): 533–539.
- Li Xinzi, Liu Bin, Wu Xiaoling, et al. Distribution and rheological characteristics of evaporates in Tongnanba area [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(4): 533–539.
- [16] 金之钧, 龙胜祥, 周雁, 等. 中国南方膏盐岩分布特征[J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27(5): 571–583.
- Jin Zhijun, Long Shengxiang, Zhou Yan, et al. A study on the distribution of saline-deposit in southern China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 27(5): 571–583.
- [17] Marton G, Tari G, Lehmann C. Evolution of Angolan passive margin, West Africa, with emphasis on post-salt structural styles [C] // *Atlantic rifts and continental margins*. American Geophysical Union, Geophysical Monograph Series, 2000, 115: 129–149.
- [18] 门玉澎, 许效松, 牟传龙, 等. 中上扬子寒武系蒸发岩岩相古地理[J]. *沉积与特提斯地质*, 2010, 30(3): 58–64.
- Men Pengyu, Xu Xiaosong, Mu Chuanlong, et al. Sedimentary facies and palaeogeography of the evaporates in the middle-upper Yangtze area [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2010, 30(3): 58–64.
- [19] 王淑丽, 郑绵平, 焦建. 上扬子区寒武系蒸发岩沉积相及成钾潜力分析[J]. *地质与勘探*, 2012, 48(5): 947–958.
- Wang Shuli, Zheng Mianping, Jiao Jian. Sedimentary facies of the Cambrian evaporites in the upper Yangtze region and their potash forming potential [J]. *Geology and Exploration*, 2012, 48(5): 947–958.
- [20] 陈洪德, 田景春, 刘文均, 等. 中国南方海相震旦系—中三叠统层序划分与对比[J]. *成都理工学院学报*, 2002, 29(4): 355–379.
- Chen Hongde, Tian Jingchun, Liu Wenjun, et al. Division and correlation of the sequences of marine Sinian system to middle Triassic series in the South of China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2002, 29(4): 355–379.
- [21] 徐美娥, 张荣强, 彭勇民, 等. 四川盆地东南部中、下寒武统膏岩盖层分布特征及封盖有效性[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(3): 301–306.
- Xu Mei'e, Zhang Rongqiang, Peng Yongmin, et al. Distribution and sealing effectiveness of Middle-Lower Cambrian evaporite cap rocks in the southeastern Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(3): 301–306.
- [22] Liu Shugen, Deng Bin, Li Zhiwu, et al. Architecture of basin-mountain systems and their influences on gas distribution: a case study from the Sichuan basin, South China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 47(1): 204–215.
- [23] Clark M K, Schoenbohm L M, Royden L H, et al. Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns [J]. *Tectonics*, 2004, 23(1): 1–20.
- [24] Richardson N J, Densmore A L, Fowler S D, et al. Extraordinary denudation in the Sichuan Basin: insights from low-temperature thermochronology adjacent to the eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(B4): 1–23.
- [25] Yan D P, Zhou M F, Song H L, et al. Origin and tectonic significance of a Mesozoic multi-layer over-thrust system within the Yangtze Block (South China) [J]. *Tectonophysics*, 2003, 36(1): 239–254.
- [26] 邱楠生, 秦建中, Brent I A McInnes, 等. 川东北地区构造—热演化探讨——来自(U–Th)/He年龄和 R_0 的约束[J]. *高校地质学报*, 2008, 14(2): 223–230.
- Qiu Nansheng, Qin Jianzhong, McInnes B I A, et al. Tectonothermal evolution of the northeastern Sichuan basin: constraints from apatite and zircon (U–Th)/He ages and vitrinite reflectance data [J]. *Geological Journal of China University*, 2008, 14(2): 223–230.
- [27] 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉, 等. 四川盆地形成与演化[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 163–175.
- Guo Zhengwu, Deng Kangling, Han Yonghui, et al. The formation and evolution of Sichuan basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 163–175.
- [28] Jackson M P A, Talbot C J. External shapes, strain rates and dynamics of salt structures [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1986, 97(3): 305–323.
- [29] Brantut N, Han R, Shimamoto T, et al. Fast slip with inhibited temperature rise due to mineral dehydration: evidence from experiments on gypsum [J]. *Geological Society of America*, 2001, 39(1): 59–62.
- [30] McIntyre J F. Presence and control of evaporite top seals on occurrence and distribution of hydrocarbon traps: main fairway, Central Overthrust Belt, Wyoming and Utah [J]. *AAPG Bulletin*, 1988, 72(2): 221–234.
- [31] 王国芝, 刘树根. 海相碳酸盐岩区油气保存条件的古流体地球化学评价——以四川盆地中部下组合为例[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 36(6): 631–644.
- Wang Guozhi, Liu Shugen. Paleo-fluid geochemical evaluation of hydrocarbon preservation in marine carbonate rock areas: taking lower association in central Sichuan basin as an example [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2009, 36(6): 631–644.

- 22(1):61-78.
- [11] 徐长贵. 陆相断陷盆地源-汇时空耦合控砂原理:基本思想、概念体系及控砂模式[J]. 中国海上油气, 2013, 25(4):1-11.
Xu Changgui. Controlling sand principle of source-sink coupling in time and space in continental rift basin: basic idea, conceptual systems and controlling sand models[J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25(4):1-11.
- [12] 余一欣, 周心怀, 魏刚, 等. 渤海湾地区构造变换带及油气意义[J]. 古地理学报, 2008, 10(5):555-560.
Yu Yixin, Zhou Xinhui, Wei Gang, et al. Structural transfer zones and the hydrocarbon significances in Bohai Bay area[J]. Journal of Palaeogeography, 2008, 10(5):555-560.
- [13] 周心怀, 余一欣, 魏刚, 等. 渤海辽东湾海域 JZ25-1S 转换带与油气成藏的关系[J]. 石油学报, 2008, 29(6):837-840.
Zhou Xinhui, Yu Yixin, Wei Gang, et al. Relationship between JZ25-1S transfer zone and hydrocarbon accumulation in Liaodongwan off shore of Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(6):837-840.
- [14] 余一欣, 周心怀, 汤良杰, 等. 渤海海域辽东湾坳陷正断层联接及其转换带特征[J]. 地质论评, 2009, 55(1):79-84.
Yu Yixin, Zhou Xinhui, Tang Liangjie, et al. Linkages of normal faults and transfer zones in the Liaodongwan depression, offshore Bohai Bay basin[J]. Geological Review, 2009, 55(1):79-84.
- [15] 王涛. 中国东部裂谷盆地油气藏地质[M]. 北京:石油工业出版社, 1997.
Wang Tao. Oil and gas reservoir geology of rift basins in east China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [16] 余一欣, 周心怀, 徐长贵, 等. 渤海辽东湾坳陷金县构造变换带发育特征[J]. 现代地质, 2013, 27(5):999-1004.
Yu Yixin, Zhou Xinhui, Xu Changgui, et al. Formation of JX transfer zone in the Liaodongwan depression, offshore Bohai Bay basin[J]. Geoscience, 2013, 27(5):999-1004.

(编辑 董立)

(上接第631页)

- [32] 徐国盛, 袁海峰, 马永生, 等. 川中-川东南地区震旦系-下古生界沥青来源及成烃演化[J]. 地质学报, 2007, 81(8):1143-1152.
Xu Guosheng, Yuan Haifeng, Ma Yongsheng, et al. The source of Sinian and Lower Palaeozoic bitumen and hydrocarbon evolution in the middle and southeast of the Sichuan basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(8):1143-1152.
- [33] 黄文明. 四川盆地地下古生界油气地质条件及勘探前景[D]. 成都理工大学, 2011.
Huang Wenming. Petroleum geological conditions and exploration prospects of Lower Paleozoic in Sichuan basin[D]. Chengdu University of Technology, 2011.
- [34] 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. TSR对深部碳酸盐岩储层的溶蚀改造——四川盆地深部碳酸盐岩优质储层形成的重要方式[J]. 岩石学报, 2006, 22(8):2182-2194.
Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. Dissolution and alteration of the deep carbonate reservoirs by TSR: an important type of deep buried high quality carbonate reservoirs in Sichuan basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(8):2182-2194.
- [35] Cai C F, Xie Z Y, Worden R H, et al. Methane-dominated thermochemical sulphate reduction in the Triassic Feixianguan Formation in East Sichuan Basin, China: toward prediction of fatal H₂S concentrations[J]. Marine and Petroleum Geology, 2004, 21(1):1265-1279.
- [36] 马永生, 郭彤楼, 朱光有, 等. 硫化氢对碳酸盐岩储层溶蚀改造作用的模拟实验证据——以川东飞仙关组为例[J]. 科学通报, 2007, 52(1):178-183.
Ma Yongsheng, Guo Tonglou, Zhu Guangyou, et al. Simulated experiment evidences of the corrosion and reform actions of H₂S to carbonate reservoirs: an example of Feixianguan Formation, East Sichuan[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(1):178-183.
- [37] 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 四川盆地威远气田硫化氢的成因及其证据[J]. 科学通报, 2006, 51(23):2780-2788.
Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. The genesis of H₂S in the Weiyuan gas field, Sichuan Basin and its evidence[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(23):2780-2788.
- [38] 黄文明, 刘树根, 马文辛, 等. 四川盆地奥陶系油气勘探前景[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(3):461-473.
Huang Wenming, Liu Shugen, Ma Wenxin, et al. Petroleum exploration potential of the Ordovician in the Sichuan basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(3):461-473.
- [39] 刘晓峰, 解习农. 与盐构造相关的流体流动和油气运聚[J]. 地学前缘, 2001, 8(4):343-349.
Liu Xiaofeng, Xie Xinong. Fluid flow, hydrocarbon migration and accumulation associated with salt structure[J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(4):343-349.
- [40] 聂明龙, 吴蕾, 孙林, 等. 阿姆河盆地查尔朱阶地及邻区盐相关断裂特征与油气地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(6):803-808.
Nie Minglong, Wu lei, Sun lin, et al. Salt-related fault characteristics and their petroleum geological significance in Zarzhu terrace and its adjacent areas, the Amu Darya Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(6):803-808.

(编辑 李军)