

四川盆地大中型气田形成的主控因素及勘探对策

洪太元,程 喆,许华明,陈 前
(中国石化石油勘探开发研究院,北京 102206)

摘要:作为世界上最早开发利用天然气的地区,四川盆地油气资源丰富,已经发现了 28 个工业油气产层,建立起了我国第一个完整的天然气工业体系。在对四川盆地大中型气田形成的主控因素分析的基础上,进一步明确盆地大中型气田的勘探有利领域与方向。四川盆地具有裂陷槽控烃、古隆起控藏、侵蚀面控储、盖层控保、断裂控储的天然气富集特点。近源供烃、大型古隆起聚集、侵蚀不整合面溶蚀碳酸盐岩有效储集、区域稳定盖层保存、深大断裂输导等是天然气得以富集的主控因素,大中型气田的勘探重点应该围绕三大古隆起、两个裂陷槽以及基底断裂展开,通过优选,认为海相碳酸盐岩领域中震旦系—下古生界、二叠系—三叠系高能相带及三叠系雷口坡组,陆相致密碎屑岩,二叠系火成岩以及页岩气等领域是下步大中型油气田的有利勘探领域。

关键词:天然气富集;主控因素;大中型油气田;有利领域;四川盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Controlling factors and countermeasures for exploring large and medium-sized gas fields in Sichuan Basin

HONG Taiyuan, CHENG Zhe, XU Huaming, CHEN Qian

(SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 102206, China)

Abstract: The Sichuan Basin has been known to be rich of oil and gas resources, and after the exploration and development for more than 70 years, oil and gas reservoirs (mainly gas reservoirs) have been widely discovered in 28 strata, and the first complete gas industrial system has been built in this basin. The main constraint factors for the formation of large and medium-sized gas fields in the Sichuan Basin were discussed in this paper, and some favorable exploration targets were proposed. The enrichment of natural gas in the Sichuan Basin has several characteristics including the generation, accumulation, reservoir, preservation and migration of natural gas which were controlled by rift troughs, paleo-uplifts, erosion surfaces, cap rocks and faults, respectively. Near-source hydrocarbon supply, hydrocarbon accumulation in paleo-uplifts, effective reservoirs caused by the dissolution of carbonate rocks at the erosion surface of unconformity, regional stable preservation by cap rocks and migration through deep and large faults were the main controlling factors for natural gas enrichment. Therefore, the exploration activity for large and medium-sized gas fields was suggested to focus on 3 paleo-uplifts, 2 rifted troughs, and the basement faults in the Sichuan Basin. Through optimization, it was concluded that the Sinian to Lower Paleozoic strata, the high-energy phase band of Permian-Triassic and the Leikoupo Formation of Triassic in the marine carbonate area, the tight continental clastic rocks, the volcanic rocks in Permian and the shale gas areas are the favorable fields for further exploring for large and medium-sized gas fields.

Key words: enrichment of natural gas; constraint factors; large and medium-sized gas fields; favorable zones; Sichuan Basin

1 四川盆地天然气勘探概况

四川盆地是在上扬子克拉通基础上发展起来的大型多旋回叠合盆地,面积约 $19 \times 10^4 \text{ km}^2$,自西向东依次划分为川西低陡构造带、川西南低陡构造

带、川中平缓构造带、川北低缓构造带、川南低陡构造带、川东高陡构造带。经历了震旦纪—中三叠世克拉通盆地和晚三叠世—新生代前陆盆地两大阶段,在前震旦系变质岩基底之上沉积了巨厚的海、陆相地层,地层总厚度达 6~12 km。盆地油气资源

丰富,据全国油气资源动态评价(2015)^[1],四川盆地常规天然气资源量 $20.69 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中海相层系地质资源量 $14.63 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 、陆相层系地质资源量 $6.06 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。截至2019年底,天然气探明储量 $3.96 \times 10^{12} \text{ m}^3$,天然气探明率 19%;页岩气地质资源量 $57.45 \times 10^{12} \text{ m}^3$,累计探明储量 $1.81 \times 10^{12} \text{ m}^3$,探明率 3.2%。

四川盆地的油气勘探已经有近两百年的历史,早在19世纪40年代,就已经开始了天然气的勘探开发和利用,经过新中国70多年来的发展,已经建立起了我国第一个完整的天然气工业体系。近年来,中国石油、中国石化等的油气田分公司以寻找规模优质储量、发现大中型气田为目标,不断深化地质理论认识,突出规模优质储层展布精细刻画、山前复杂构造带精细构造建模、大型构造斜坡区及低部位的成藏特征研究,依托地质—地球物理—工程等专业多方位联合技术的进步,高效推动了四川盆地天然气勘探,先后发现普光、龙岗、元坝、安岳、涪陵、威远—长宁、彭州、威荣等一大批大中型气田,天然气勘探开发进入快速发展期(图1)。

四川盆地天然气分布层位多,在震旦系—侏罗系共有28个层系取得油气发现;领域广,从海相到陆相领域均有重大发现。很多研究人员已经对盆地的天然气富集规律和主控因素做了大量的研究工作^[2-20],本文拟在前人研究的基础上,总结四川盆地大中型气田成藏的主控因素,提出四川盆地大中型气田勘探的有利领域和方向,以期对该盆地天然气的勘探有所裨益。

2 大中型气田形成的主控因素

四川盆地经历了多旋回构造运动,发育两期克

拉通内大型裂隙和5个大型不整合面,控制了大中型气田的分布,造就了四川盆地特有的天然气成藏富集特征。综合前人研究成果,四川盆地大中型气田的形成主要受控于烃源岩、大型古隆起、大型不整合、区域稳定盖层、深大断裂等^[3,6-7,10-11]。

2.1 烃源岩控制油气田的分布

四川盆地地史演化过程中,发育了绵阳—长宁、开江—梁平等古裂隙以及晚三叠世之后的淡水广盆。古裂隙中发育厚层有效烃源岩,为天然气藏的形成提供充足的烃类来源。不同时期的沉积中心控制了相应的烃源岩分布,进而控制了不同层系的天然气富集^[7]。

勘探实践表明,烃源始终是油气成藏的关键物质基础,大中型油气藏的形成,离不开优质的烃源条件。四川盆地共发育有7套烃源岩,包括5套海相烃源岩和2套陆相烃源岩:发育了上震旦统陡山沱组黑色页岩,主要分布在川东,厚度40~60 m;下寒武统筇竹寺组泥岩烃源岩,全盆均有分布,厚度10~100 m;下志留统龙马溪组下部黑色页岩,一般厚10~30 m,为盆地最好烃源岩之一,有机碳含量1%~3%;二叠系龙潭组灰黑色泥页岩,厚度40~80 m和大隆组泥岩,厚度30~100 m,主要分布在川东北及川西北地区等5套海相烃源岩以及上三叠统须家河组三段泥岩,厚约100~200 m;下侏罗统自流井组暗色泥岩段厚度一般40~80 m等2套陆相烃源岩及其烃源灶,为四川盆地大中型油气田的形成提供了雄厚的物质基础。

大型油气田均围绕生烃中心发育。(1)绵阳—长宁裂隙槽,下寒武统生烃中心控制了震旦系—寒武系大型气田的分布。其主要烃源岩为下寒武统筇竹寺组暗色泥岩,厚度可达300~500 m,

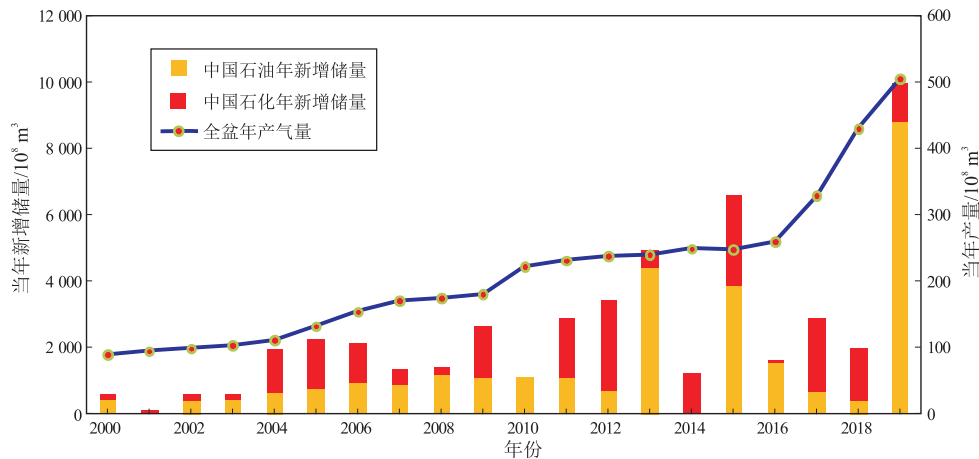


图1 四川盆地勘探进展简图

Fig.1 Exploration progress in Sichuan Basin

生气强度 $(60 \sim 100) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 已发现威远、安岳、磨溪等 3 个大型气田; (2) 开江—梁平裂陷槽, 上二叠统生烃中心控制了长兴组—飞仙关组礁滩气田群的分布。其主要烃源岩是二叠系大隆组, 烃源岩厚度 $20 \sim 40 \text{ m}$, 生气强度 $(10 \sim 40) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 已发现普光、元坝、龙岗等 14 个气田。

晚三叠世至侏罗纪淡水广盆沉积, 形成了陆相多个天然气富集区。盆地中主要烃源岩为上三叠统须家河组三段及下侏罗统暗色泥岩, 厚度大, 川西生气强度大于 $10 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 龙门山前带达 $(20 \sim 50) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$; 已发现气田主要集中在川西坳陷陆相地层中, 目前已发现新场、成都等 9 个气田。

2.2 大型古隆起控制油气聚集

盆地经历了加里东、海西、印支等构造运动, 形成了川中、泸州、开江三大古隆起, 三大古隆起作为有利的油气运移指向区, 提供了大型油气聚集的构造背景, 对油气藏的形成与富集具有明显的控制作用(图 2)。加里东期形成的川中古隆起控制了震

旦系灯影组气藏、寒武系龙王庙组气藏的形成, 加里东期以来构造发育与成藏过程高度匹配, 使得安岳—威远气田高度富集; 海西期形成的开江古隆起控制了石炭系气藏的形成, 海西运动以来构造与志留系凹陷区广覆式烃源岩叠置分布, 形成川东石炭系气藏群; 印支期形成的泸州古隆起控制了上三叠统嘉陵江组气藏的形成, 川中泸州古隆起、龙门山前逆冲背斜带印支期以来稳定发育, 使得陆相气田广泛分布。

2.3 规模储集体控制油气藏的规模

规模储集体与源灶的匹配控制海相大中型油气田的分布, 海相碳酸盐岩主要发育沉积型和改造型两类规模储层, 以改造型储层为主。由于大型不整合的侵蚀作用, 遭受长期风化淋滤作用, 对不整合面之下风化壳形成有效的改造, 提高储层的储集物性, 为气藏的形成提供了优质的储集空间; 同时, 不整合面作为油气运移的输导通道, 为气藏的形成提供了保证(图 3)。

四川盆地中生代以前经历了多次构造运动, 形

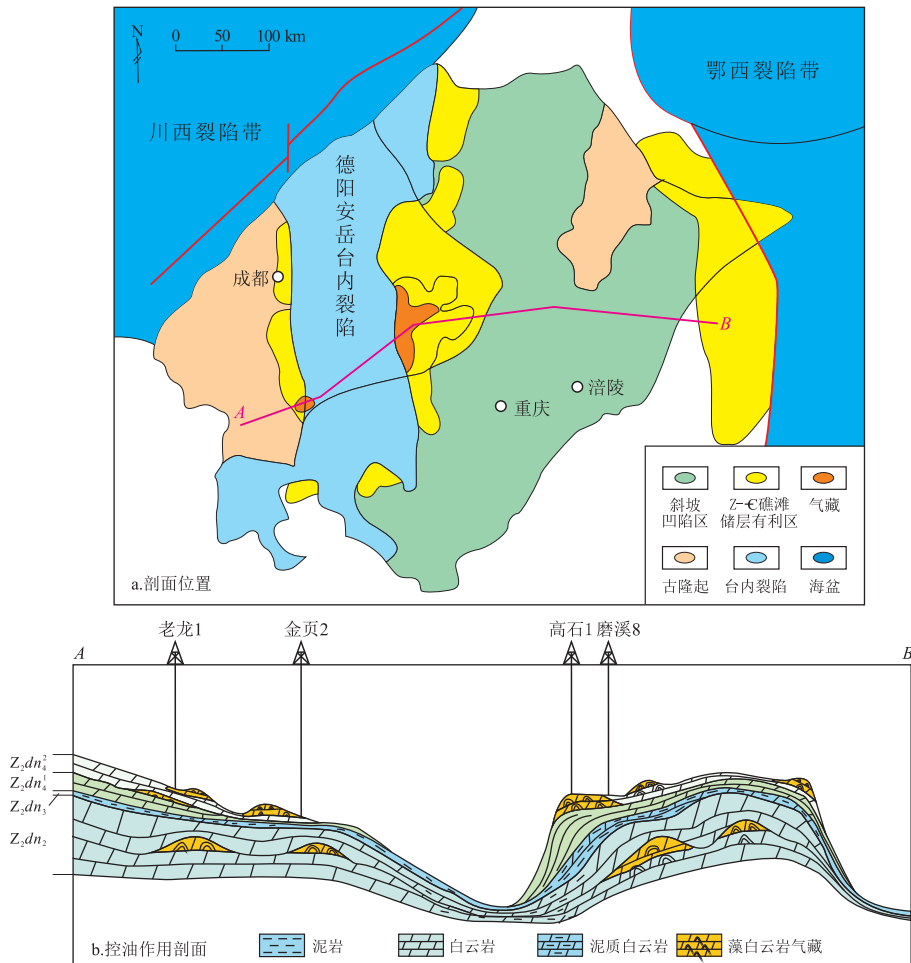


图 2 四川盆地古隆起控油作用剖面示意

Fig.2 Schematic section showing reservoirs constrained by paleo uplift in Sichuan Basin

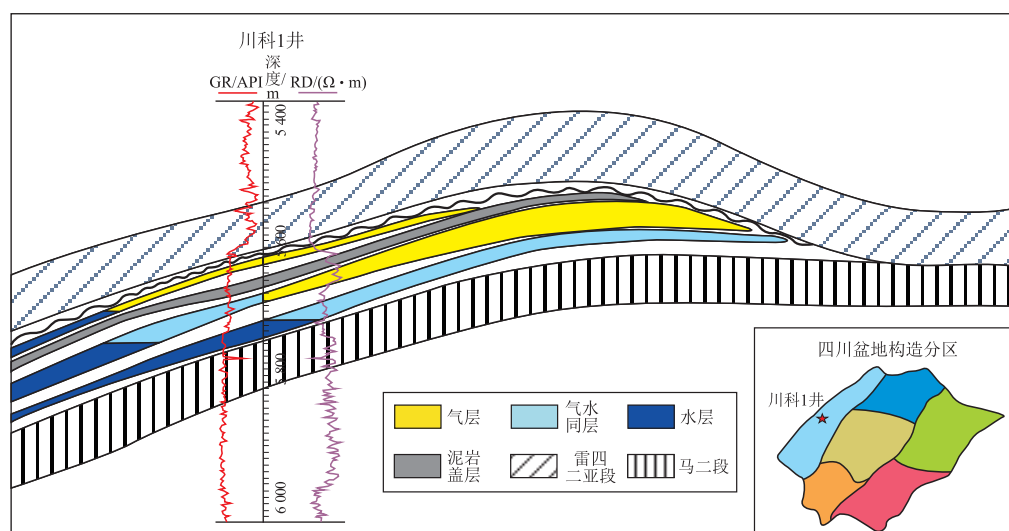


图3 川西地区过川科1井雷口坡组近南北向剖面

Fig.3 Near north-south section of the Leikoupo Formation in the western part of Sichuan Basin

成了多个不整合,为气藏的形成提供了有利的聚集场所。元古代晚期的桐湾运动使灯影组顶部长期风化溶蚀,灯四段成为震旦系最有利的含气层系;早二叠世晚期的东吴运动使中二叠统顶部长期风化溶蚀,茅三段成为中二叠统最有利的含气层系;晚三叠世的印支运动使雷口坡组顶面遭受长期风化溶蚀,“雷四段”成为中三叠统最有利的含气层系。

2.4 区域稳定封盖条件控制油气田的保存

良好的保存条件是油气藏长期得以保存的必要条件。四川盆地海相层系中发育有3套区域性的泥质岩盖层(下寒武统、志留系、上二叠统)与两套区域性膏盐岩盖层(中下寒武统,中下三叠统),对海相各套成藏组合油气的封堵具有重要作用;陆相侏罗系多套湖相泥岩为侏罗系河湖相砂岩储层提供了盖层保证。(1)筇竹寺组暗色泥岩,成为下伏灯四段区域稳定盖层;(2)马鞍塘—小塘子组暗色泥岩,成为川西雷口坡组稳定盖层;(3)飞仙关组—嘉陵江组膏盐岩,成为下伏二叠系区域稳定盖层;(4)陆相侏罗系中多套湖相泥岩,成为下伏侏罗系河湖相砂岩的盖层。

2.5 深大断裂控制油气藏的形成和保存

输导体系是否有效沟通决定碳酸盐岩储层能否成藏,输配的规模性决定成藏规模。深大断裂控制沟通深部热液,改善储层物性;又沟通烃源,是油气藏形成的输导体系。四川盆地发育一系列NW-SE及NE-SW向深大基底断裂,这一系列基底断裂既沟通烃源岩,又改造提升储集性能,是气藏的高产富集区,龙门山前带、米仓大巴山断裂带、雪峰—江南断裂带更为富集高产。统计近年来试气

日产量超过 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的探井大多位于基底断裂周边(图4)。

必须看到,深大断裂同时也对油气藏具有大的破坏作用,在盆地周缘褶皱变形强烈,断裂发育,保存条件差,不利于成藏,钻井大多产水(图4)。

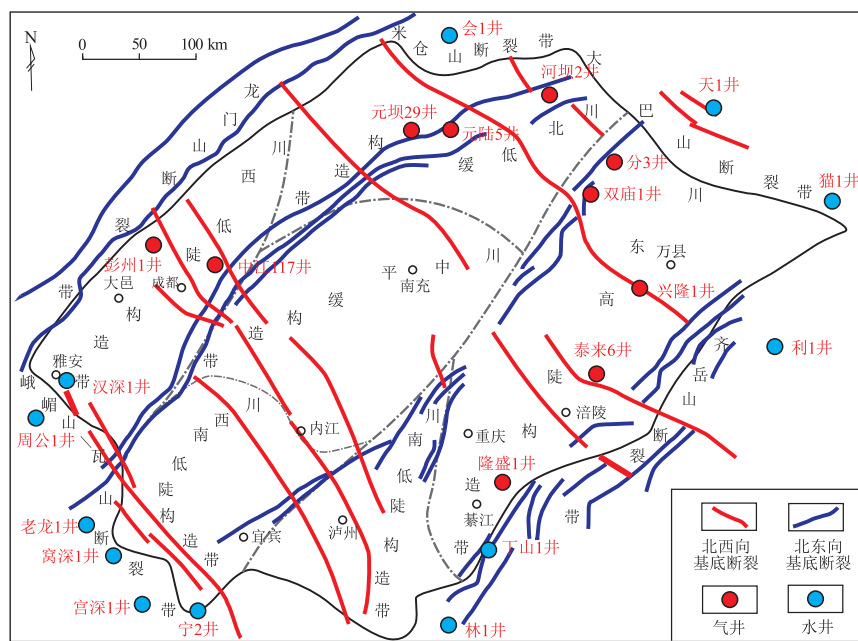
3 大中型气田有利勘探领域与方向

截至2019年底,四川盆地常规天然气剩余资源量 $16.73 \times 10^{12} \text{ m}^3$,探明率19%;页岩气剩余地质资源量 $55.64 \times 10^{12} \text{ m}^3$,探明率仅3.2%,无论是常规天然气还是页岩气勘探领域,均有巨大的勘探潜力。

盆地天然气资源主要分布在海相碳酸盐岩中的震旦系、寒武系、志留系、石炭系、二叠系—三叠系及陆相三叠系和侏罗系中(表1),目前盆地仍然处于勘探的早中期阶段,具备巨大的勘探潜力,是寻找大中型气田的有利地区。四川盆地特有的天然气成藏富集特征表明,勘探中需要综合考虑上述天然气富集的主控因素,才能优选出富集高产有利区。大中型气田的勘探重点围绕三大古隆起、两个裂陷槽以及基底断裂展开。通过优选,认为海相碳酸盐岩领域中震旦系—下古生界、二叠系—三叠系高能相带,中三叠统雷口坡组,陆相致密碎屑岩,二叠系火山岩以及页岩气等领域是下步大中型气田勘探的主要方向。

3.1 海相碳酸盐岩

四川盆地海相碳酸盐岩资源丰富,天然气资源量为 $14.33 \times 10^{12} \text{ m}^3$,居全国各盆地之首,勘探潜力巨大,已探明天然气地质储量 $2.2 \times 10^{12} \text{ m}^3$,剩余地



彭州1井:雷四段,日产气(114.91×10⁴ m³)
 中江117井:下沙溪庙组,日产气(14.82×10⁴ m³)
 汉深1井:灯二段,日产水8.6 m³
 周公1井:灯二段,日产水7.68 m³
 老龙1井:灯二段—南沱组,日产水91.88 m³;灯二段,日产水33.64 m³;灯四段,日产水104.95 m³
 窝深1井:灯二段3个层位日产水10.31, 65.82, 69.41 m³
 会1井:灯二段日产水244.5 m³,水型Na₂SO₄
 元陆5井:自流井组,日产气150.39×10⁴ m³
 元坝29井:长兴组,日产气142.97×10⁴ m³
 河坝2井:飞三组,日产气204×10⁴ m³
 天1井:洗象池群中测日产水4.32~11.95 m³
 天2井:洗象池群测试日产水400 m³
 分3井:长兴组,日产气83.5×10⁴ m³
 双庙1井:嘉二段,日产气(33.59×10⁴ m³)
 猫1井:测试寒武系高台组,日产水2 034 m³
 泰来6井:茅三段,日产气(11.08×10⁴ m³)
 兴隆1井:长兴组,日产气(51.71×10⁴ m³)
 隆盛1井:茅口组,日产气(20.6×10⁴ m³)
 利1井:中测龙王庙组折算日产水13.05 m³;灯影组测试日产水111.6 m³
 宫深1井:灯二段2个层位中测日产水20.45, 400.24 m³
 宁2井:洗象池群1次溢水;高台组2次溢水;箬竹寺组1次溢盐水
 丁山1井:灯影组测井解释水层
 林1井:MFE取得地层水

图 4 四川盆地试气日产大于 10 万立方米探井井位与基底断裂叠合

Fig.4 Overlay map of basement faults and exploratory wells with a daily production more than 1.0 × 10⁵ m³ in Sichuan Basin

表 1 四川盆地含油气层系常规天然气资源量

Table 1 Conventional resource abundance of oil and gas bearing strata in Sichuan Basin

层系	探明储量/ 10 ⁸ m ³	剩余资源量/ 10 ⁸ m ³	总资源量/ 10 ⁸ m ³	探明程度/ %	已发现典型油气藏
震旦系	5 941	19 474	25 415	23	安岳、威远
寒武系	4 461	14 634	19 095	23	磨溪
奥陶系	2	1 165	1 167	0	东山、威远
志留系	0	3 369	3 369	0	
石炭系	2 412	10 088	12 500	19	大天池、七里峡、卧龙河、相国寺
中二叠统	852	19 148	20 000	4	邛西、圣灯山、威远
上二叠统长兴组— 下三叠统飞仙关组	9 735	31 858	41 593	23	普光、元坝、河坝场
下三叠统嘉陵江组	1 227	10 801	12 028	10	兴隆场、宜宾、赤水
中三叠统雷口坡组	855	10 316	11 171	8	彭州、中坝
上三叠统须家河组	10 956	37 506	48 462	23	合兴场、马路背
侏罗系	3 126	8 991	12 117	26	成都、白马庙
合计	39 567	167 350	206 917	19 (均值)	

注:数据截至 2019 年底。

质资源量 12.12×10¹² m³,资源探明程度 15.4%。海相领域油气田具有规模整装的特点。近几年勘探成果表明,海相领域正处于油气大发现、大发展阶段,是实现天然气大发展的现实领域。但同时也面临着埋藏深、储集类型多样、有效储层与目标识别勘探难题,以及超高温、超高压复杂地层条件下的钻井工程、储层有效改造等技术问题。

3.1.1 震旦系—下古生界

四川盆地元古界的震旦系以及古生界的寒武系—志留系是海相下组合的一套海相沉积组合,具有台缘礁滩、台内滩、岩溶不整合等多种储层类型,油气勘探层系主要包括震旦系—寒武系、奥陶系、

志留系、泥盆系等五大层系,已经发现威远、安岳、涪陵、威荣等大气田(表 2)。

下一步应该继续围绕绵阳—长宁海槽的两侧,在开展沉积相精细描述的基础上,寻找震旦系台缘滩和寒武系的有利沉积相带;重点针对川东北元坝—通南巴、阆中、建南、普光、井研—犍为地区开展研究和部署,重点勘探方向为:绵阳—长宁裂陷槽北段台缘丘滩高能相带;川东被动大陆边缘台缘高能相带盐下构造有利发育区;川东陡山沱—灯影早期古裂陷边缘丘滩高能相带;川西地区泥盆系观雾山组碳酸盐岩浅滩以及川中古隆起斜坡带寒武系—奥陶系^[17]。

表2 四川盆地震旦系—下古生界发现的主要油气田

Table 2 Major oil and gas fields discovered in Sinian-Lower Paleozoic strata in Sichuan Basin

油气田名称	探明储量/ 10^8 m^3	发现时间/年	油气层位	储集类型	主要圈闭类型
威远	1.66	1975	桐梓组	孔隙—裂缝	岩性—构造
东山	0.55	1987	奥陶系	缝洞型	岩性—构造
安岳	4 403.83	2013	龙王庙组	孔隙型	构造
安岳	4 083.96	2012	灯影组四段	裂缝—孔隙	构造
威远	11.02	1975	洗象池群	孔隙—裂缝	裂缝
威远	400.00	1964	灯影组	缝洞型	岩性—构造
长宁—威远	1 635.32	2011	五峰组—龙马溪组	孔隙—裂缝	裂缝
涪陵	6 008.14	2012	五峰组—龙马溪组	孔隙—裂缝	裂缝
南川—武隆	543.06	2016	龙马溪组	孔隙—裂缝	裂缝
威荣	1 246.78	2015	龙马溪组	孔隙—裂缝	裂缝

3.1.2 二叠系—三叠系高能相带

二叠系—三叠系是四川盆地海相上组合的一套海相沉积组合,包括浅滩、台缘礁滩等,目前已在二叠系栖霞组、茅口组、长兴组,三叠系飞仙关、嘉陵江组等层段发现 97 个气田;在开江—梁平裂陷槽两侧已发现普光、元坝等多个二叠系—三叠系长兴组—飞仙关组台缘礁滩大型气田,揭示了四川盆地二叠系—三叠系高能相带巨大的勘探潜力。

根据目前的勘探程度,下步大中型气田有利勘探层系包括茅口组、长兴组、栖霞组和飞仙关组。

茅口组主要围绕开江—梁平裂陷槽两侧的台缘礁滩及基底断裂展开;受基底断裂的影响和作用,茅三段热液白云岩沿北西向基底断裂呈带状分布,泰来、阆中、川西及川西南 4 个有利区;川东南茅一段灰泥灰岩是一种新的储层类型,储集空间类型主要为滑石成岩收缩孔(缝)、粒内溶孔、界面缝(矿物及岩性)和有机质孔,平均孔隙度 4.5%;裂缝对于储集空间有一定贡献,储层类型为裂缝—孔隙型,储层厚 35~50 m,纵、横向分布稳定。

川北通南巴、川东北乐坝、川东焦石坝、鸣玉、义和等地区是下步茅口组突破和增储有利的勘探方向;川西、川北地区栖霞组台内浅滩白云岩储层发育;龙探 1 井二叠系栖霞组获高产,证实了米仓山前缘南江断褶带栖霞组有利的成藏条件;高能台内浅滩白云岩发育,通源断裂发育,膏盐岩盖层未断穿。

普光区块长兴组生屑滩、元坝地区茅三段高能礁滩等都是有利的勘探目标区。

开江—梁平裂陷槽东侧台缘带、开江—梁平裂陷槽西侧台缘带至广安台内高带、遂宁台内高带,都是礁滩气藏富集的有利区带。

川西、米仓—大巴山山前带龙门山前带自古代以来经历了陆缘裂谷、克拉通周边拗陷、陆缘拗

陷、陆内前陆等盆地演化阶段,发育多套源储配置。在龙门山前隐伏构造带北段已发现双鱼石气藏,证实该带为油气勘探的有利区带^[6]。龙门山前隐伏构造带中段与龙门山前隐伏构造带北段具有相似的构造特征,寒武系—下三叠统深大断裂发育,为油气运移的良好通道;同时,中二叠统发育多排背冲构造,成藏条件优越。预测龙门山前隐伏构造带中段川西探区内中二叠统白云岩储层有利区面积近 700 km²,估算区带资源量近 400×10⁸ m³,勘探潜力大,是下步有利的勘探领域。

3.1.3 中三叠统雷口坡组

四川海相叠合盆地经历了多旋回构造运动,形成了多个不整合,其中桐湾运动形成灯影组二段、四段不整合,加里东运动形成的下古生界不整合,云南运动形成的石炭系不整合,东吴运动形成的下二叠统不整合以及印支早幕运动形成的雷口坡组不整合是 5 个重要的大型不整合,这些不整合对于盆地油气成藏起了重要的控制作用。

川西海相雷口坡组大型不整合尤为重要。雷口坡组是中三叠世四川叠合盆地海相碳酸盐岩演化阶段的最后层段,此后,四川盆地结束了台地演化,进入了陆相沉积及盆地形成时期;雷口坡组自下而上可以划分为 5 段,主要为局限台地相沉积,部分地区为开阔台地和蒸发台地相,主要亚相为潟湖和潮坪;岩性为白云岩、石灰岩、石膏及泥页岩的组合。受后期构造运动的影响,盆地雷口坡组大部遭受剥蚀,在川西地区残留厚度大,早期紧邻台缘相带,后期受印支运动时期整体抬升暴露,形成优质岩溶白云岩储层;具有多源、多期供烃,构造岩性圈闭控藏,隆起带、斜坡带富集的油气成藏特点。最新研究成果表明,雷口坡组区带资源量近万亿立方米,具备形成大型气田的资源潜力,前期雷口坡组发现中

坝、磨溪、卧龙河气田。近期,川科 1、彭州 1 等井在川西雷口坡组相继试获高产工业气流,揭示了雷口坡组大型不整合面良好的勘探前景,发现了川西气田,预计新增天然气地质储量逾 $0.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。川西山前彭州—新场构造、广汉斜坡、川东北元坝—通南巴是下步有利的勘探方向;川西南—川中地区印支末期古侵蚀面与雷口坡组多套滩相白云岩叠加,发育滩相岩溶型储层,也是寻找构造—地层气藏、构造—岩性气藏有利方向^[17]。

3.2 致密碎屑岩

自晚三叠世开始,四川盆地进入陆内前陆盆地发展阶段,纵向上形成了三角洲相砂体与湖相泥岩广覆式间互的沉积充填特征,造就了多套烃源岩、多套储集层、多套生储盖组合以及大面积岩性圈闭的形成。陆相致密碎屑岩发育自生自储岩性油气藏和远源次生岩性油气藏两种油气藏类型。四川盆地陆相碎屑岩常规天然气资源量大,资源量 $6.06 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 探明储量 $1.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 探明率 23.2%, 剩余资源量 $4.65 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 勘探潜力大。

3.2.1 上三叠统须家河组

须家河组致密气资源量 $4.85 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 目前探明储量 $1.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (已发现广安、合川等多个大型气田), 探明率 23%, 待探明资源 $4.85 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。须家河组三角洲前缘相砂体与湖相泥岩呈广覆式间互沉积, 形成了多套烃源岩、多套储层、多套生储盖组合以及大面积岩性圈闭的特点。川西坳陷、川东北马路背、川中、川东地区须家河组下步是持续增储, 培育大中型气田的有利领域。

3.2.2 侏罗系

侏罗系致密气资源量 $1.21 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 已发现成都、中江等气田, 探明天然气地质储量 $3.126 \times 10^{11} \text{ m}^3$, 探明率 26%。自下而上发育自流井组大安寨段、千佛崖组、沙溪庙组和蓬莱镇组 4 套勘探层系。早侏罗世早期, 四川盆地进入内陆盆地拗陷发展期, 自流井组大安寨段为大型淡水湖泊沉积; 中侏罗世早期, 盆地千佛崖组主要发育三角洲沉积体系和湖泊沉积体系, 在西缘龙门山局部地区发育冲积扇沉积体系; 中侏罗世晚期—晚侏罗世晚期, 盆地周缘物源充足且丰度较高, 沙溪庙组、蓬莱镇组广泛发育三角洲沉积体系, 烃源断层发育情况及良好的断—砂配置关系是沙溪庙组和蓬莱镇组天然气成藏的的必要条件。综合来看, 川西东坡、川东、川北元坝、巴中地区是下步勘探的有利区带。

3.3 二叠系火成岩

四川盆地川西坳陷及其周缘二叠系火山岩广

泛分布, 从火山岩的分布及储层特征来看, 盆地演化过程中经历了多次大规模的构造运动, 其中最具影响的是桐湾运动、加里东中晚期、海西早期、海西晚期、印支晚期、燕山中晚期及喜马拉雅期。海西期—东吴运动(下二叠统沉积后): 晚二叠世早期张裂运动, 裂谷发育、岩浆侵入。康滇古陆大规模隆升, 盆地内基底大断裂及高陡背斜发育玄武岩及辉绿岩体。川西凹陷东吴运动导致早期基底断裂再次发育, 形成拉张性断裂系统; 部分岩浆顺着断裂通道向上形成喷发岩体或侵入岩体, 二叠系火山岩广泛分布, 岩性主要为浅灰、灰白、绿灰色凝灰岩, (熔结)角砾凝灰岩, 凝灰质角砾岩, 含集块火山角砾岩, 夹薄层玄武岩和辉长岩; 火山角砾岩、凝灰质角砾岩、(含角砾)凝灰岩储层孔洞发育, 其中火山角砾岩、凝灰质角砾岩物性最好。

从烃源条件来看, 川西地区海相层系烃源主要有下二叠统灰岩、泥岩, 上二叠统灰岩、泥岩、煤层, 中下三叠统深灰色灰岩、白云岩, 上三叠统马鞍塘组—小塘子组海陆过渡相灰岩、泥岩, 烃源条件有利。

从运移条件来看, 川西发育多种类型油气输导通道: 不整合面、通源断裂等, 只要圈闭落实, 即可能成藏。

近期永探 1、天府 2、金山 1 等井二叠系火山岩的勘探突破表明, 川西—川中二叠系火山岩成藏条件好, 勘探潜力大, 是下步大中型油气田勘探的有利领域。

3.4 页岩气

四川盆地除了常规天然气具备大的勘探潜力外, 非常规天然气——页岩气也是四川盆地重要的油气资源。四川盆地及周缘地区页岩气资源丰富, 据“十三五”油气资源动态评价结果, 页岩气资源量 $47.69 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 这些页岩气赋存在富含有机质的页岩中, 四川盆地及周缘发育 5 套富含有机质页岩, 既有海相也有陆相页岩, 领域多, 主要分布在大川东地区。海相的页岩主要有下寒武统筇竹寺组、上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组和二叠系大隆组; 海陆过渡相的二叠系龙潭组, 陆相的有湖相中下侏罗统。这些领域页岩厚度大, 有机碳含量高, 脆性好, 从浅层到深层均有分布。自 2010 年在威远地区钻探了页岩气评价井——威 201 井获得页岩气流以来, 掀起了页岩气大规模勘探开发的序幕。近十年来, 已发现涪陵、威荣、长宁、威远、昭通、永川等 6 个大中型页岩气田, 截至 2019 年底累计探明页岩气地质储量 $1.81 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 页岩气产量

由2013年的 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 快速增长到2019年的 $154 \times 10^8 \text{ m}^3$,成为继美国、加拿大之后第三个实现页岩气商业性开发的国家。

四川盆地及周缘地区页岩气剩余资源量为 $55.64 \times 10^{12} \text{ m}^3$,探明率仅为3.2%。下步除继续评价中浅层页岩气,如焦石坝、平桥、江东、川东北、川西侏罗系自流井组东岳庙段和大安寨段以及千佛崖组等区带,不断培育大型气田外,应在加强深层页岩气成藏机理及工艺技术研究的基础上,重点开展4 500~6 000 m的深层领域的评价,使之成为下步大中型气田重点的勘探领域。

4 结论

(1)四川盆地天然气资源丰富,既有常规天然气,又有非常规的页岩气,是大中型气田勘探的有利区。

(2)四川盆地大中型气藏的形成主要受控于生烃灶、大型古隆起、大型不整合、区域稳定盖层和深大断裂等。

(3)海相碳酸盐岩领域中震旦系一下古生界、二叠系—三叠系高能相带、中三叠统雷口坡组;陆相致密碎屑岩;二叠系火山岩以及页岩气等领域是下步大中型气田勘探的主要方向。

致谢:本文引用了中国工程院咨询项目“中国大型油气田勘探的有利领域和方向研究”中的部分成果,特此致谢!

参考文献:

- [1] 国土资源部油气资源战略研究中心.全国油气资源动态评价[M].北京:中国大地出版社,2015.
Strategic Research Center of Oil and Gas Resources.Ministry of land and resources dynamic evaluation of oil and gas resources in China[M].Beijing:China Land Press,2015.
- [2] 姚雪根.四川盆地天然气成藏条件及其勘探方向[J].海相油气地质,2002,7(1):13-28.
YAO Xuegen.Accumulation and preservation conditions of natural gas in Sichuan Basin[J].Marine Origin Petroleum Geology, 2002,7(1):13-28.
- [3] 马永生,蔡勋育,李国雄.四川盆地普光大型气藏基本特征及成藏富集规律[J].地质学报,2005,79(6):858-865.
MA Yongsheng,CAI Xunyu,LI Guoxiong.Basic characteristics and concentration of the Puguang Gas Field in the Sichuan Basin[J].Acta Geologica Sinica,2005,79(6):858-865.
- [4] 马永生,蔡勋育.四川盆地川东北区二叠系—三叠系天然气勘探成果与前景展望[J].石油与天然气地质,2006,27(6):741-750.
MA Yongsheng,CAI Xunyu.Exploration achievements and prospects of the Permian-Triassic natural gas in northeastern

- Sichuan Basin[J].Oil & Gas Geology,2006,27(6):741-750.
- [5] 马永生,蔡勋育,赵培荣,等.深层超深层碳酸盐岩优质储层发育机理和“三元控储”模式:以四川普光气田为例[J].地质学报,2010,84(8):1087-1094.
MA Yongsheng,CAI Xunyu,ZHAO Peirong,et al. Formation mechanism of deep-buried carbonate reservoir and its model of three-element controlling reservoir: a case study from the Puguang Oilfield in Sichuan[J].Acta Geologica Sinica,2010,84(8):1087-1094.
- [6] 马永生,蔡勋育,赵培荣,等.四川盆地大中型天然气田分布特征与勘探方向[J].石油学报,2010,31(3):347-354.
MA Yongsheng,CAI Xunyu,ZHAO Peirong,et al. Distribution and further exploration of the large-medium sized gas fields in Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31 (3): 347-354.
- [7] 张水昌,朱光有.四川盆地海相天然气富集成藏特征与勘探潜力[J].石油学报,2006,27(5):1-8.
ZHANG Shuichang,ZHU Guangyou.Gas accumulation characteristics and exploration potential of marine sediments in Sichuan Basin[J].Acta Petrolei Sinica,2006,27(5):1-8.
- [8] 吴世祥,汤良杰,魏国齐,等.四川盆地碎屑岩领域有利天然气勘探方向浅析[J].西安石油大学学报(自然科学版),2006,21(1):20-24.
WU Shixiang,TANG Liangjie,WEI Guoqi,et al.Promising natural gas exploration belts in clastic rock formations,Sichuan Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2006,21(1):20-24.
- [9] 郭旭升,黄仁春,付孝悦,等.四川盆地二叠系和三叠系礁滩天然气富集规律与勘探方向[J].石油与天然气地质,2014,35(3):295-302.
GUO Xusheng,HUANG Renchun,FU Xiaoyue,et al.Gas accumulation and exploration direction of the Permian and Triassic reservoirs of reef-bank facies in Sichuan Basin[J].Oil & Gas Geology,2014,35(3):295-302.
- [10] 谷志东,殷积峰,袁苗,等.四川盆地东部深层盐下震旦系—寒武系天然气成藏条件与勘探方向[J].石油勘探与开发,2015,42(2):137-149.
GU Zhidong,YIN Jifeng,YUAN Miao,et al.Accumulation conditions and exploration directions of natural gas in deep subsalt Sinian-Cambrian system in the eastern Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2):137-149.
- [11] 杨光,李国辉,李楠,等.四川盆地多层系油气成藏特征与富集规律[J].天然气工业,2016,36(11):1-11.
YANG Guang,LI Guohui,LI Nan,et al.Hydrocarbon accumulation characteristics and enrichment laws of multi-layered reservoirs in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(11):1-11.
- [12] 厚刚福,周进高,谷明峰,等.四川盆地中二叠统栖霞组、茅口组岩相古地理及勘探方向[J].海相油气地质,2017,22(1):25-31.
HOU Gangfu,ZHOU Jingao,GU Mingfeng,et al.Lithofacies paleogeography and exploration realms of Middle Permian Qixia Forma-

- tion and Maokou Formation, Sichuan Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2017, 22(1): 25-31.
- [13] 杜金虎, 邹才能, 徐春春, 等. 川中古隆起龙王庙组特大型气田战略发现与理论技术创新 [J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 268-277.
- DU Jinhui, ZOU Caineng, XU Chunchun, et al. Theoretical and technical innovations in strategic discovery of a giant gas field in Cambrian Longwangmiao Formation of central Sichuan paleo-uplift, Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 268-277.
- [14] 魏国齐, 刘德来, 张林, 等. 四川盆地天然气分布规律与有利勘探领域 [J]. 天然气地球科学, 2005, 16(4): 437-442.
- WEI Guoqi, LIU Delai, ZHANG Lin, et al. The exploration region and natural gas accumulation in Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(4): 437-442.
- [15] 魏国齐, 杨威, 金惠, 等. 四川盆地上三叠统有利储层展布与勘探方向 [J]. 天然气工业, 2010, 30(1): 11-14.
- WEI Guoqi, YANG Wei, JIN Hui, et al. Distribution of favorable reservoirs and exploration targets in the Upper Triassic of the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(1): 11-14.
- [16] 魏国齐, 杨威, 杜金虎, 等. 四川盆地高石梯—磨溪古隆起构造特征及对特大型气田形成的控制作用 [J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(3): 257-265.
- WEI Guoqi, YANG Wei, DU Jinhui, et al. Tectonic features of Gaoshiti-Moxi paleo-uplift and its controls on the formation of a giant gas field, Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(3): 257-265.
- [17] 杨雨, 文龙, 谢继容, 等. 四川盆地海相碳酸盐岩天然气勘探进展与方向 [J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 44-55.
- YANG Yu, WEN Long, XIE Jirong, et al. Progress and direction of marine carbonate gas exploration in Sichuan Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 44-55.
- [18] 朱彤. 四川盆地陆相页岩油气富集主控因素及类型 [J]. 石油实验地质, 2020, 42(3): 345-354.
- ZHU Tong. Main controlling factors and types of continental shale oil and gas enrichment in Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(3): 345-354.
- [19] 唐大海, 谭秀成, 王小娟, 等. 四川盆地须家河组致密气藏成藏要素及有利区带评价 [J]. 特种油气藏, 2020, 27(3): 40-46.
- TANG Dahai, TAN Xiucheng, WANG Xiaojuan, et al. Tight gas accumulation elements and favorable zone evaluation of Xujiache Formation in Sichuan Basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(3): 40-46.
- [20] 方栋梁, 孟志勇. 页岩气富集高产主控因素分析: 以四川盆地涪陵地区五峰组—龙马溪组一段页岩为例 [J]. 石油实验地质, 2020, 42(1): 37-41.
- FANG Dongliang, MENG Zhiyong. Main controlling factors of shale gas enrichment and high yield: a case study of Wufeng-Longmaxi formations in Fuling area, Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(1): 37-41.

(编辑 黄娟)

(上接第 385 页)

- [35] 高凤琳, 宋岩, 姜振学, 等. 黏土矿物对页岩储集空间及吸附能力的影响 [J]. 特种油气藏, 2017, 24(3): 1-8.
- GAO Fenglin, SONG Yan, JIANG Zhenxue, et al. Influence of clay minerals on shale storage space and adsorptive capacity [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2017, 24(3): 1-8.
- [36] 黄金亮, 邹才能, 李建忠, 等. 川南下寒武统筇竹寺组页岩气形成条件及资源潜力 [J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 69-75.
- HUANG Jinliang, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Shale gas generation and potential of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in southern Sichuan Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 69-75.
- [37] 刘小平, 李文奇. 基于热模拟实验的富有机质泥页岩孔隙演化研究进展 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(22): 8849-8859.
- LIU Xiaoping, LI Wenqi. Research advance on pore evolution of organic-rich shale based on thermal simulation experiment [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(22): 8849-8859.
- [38] 杨潇, 姜振学, 宋岩, 等. 渝东南牛蹄塘组与龙马溪组高演化海相页岩全孔径孔隙结构特征对比研究 [J]. 高校地质学报, 2016, 22(2): 368-377.
- YANG Xiao, JIANG Zhenxue, SONG Yan, et al. A comparative study on whole-aperture pore structure characteristics between Niutitang and Longmaxi formation of high-maturity marine shales in southeastern Chongqing [J]. Geological Journal of China Universities, 2016, 22(2): 368-377.
- [39] 王子龙, 郭少斌. 鄂尔多斯盆地延安地区山西组泥页岩孔隙表征 [J]. 石油实验地质, 2019, 41(1): 99-107.
- WANG Zilong, GUO Shaobin. Pore characterization of shale in Shanxi Formation, Yan'an area, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(1): 99-107.
- [40] 熊健, 罗丹序, 刘向君, 等. 鄂尔多斯盆地延长组页岩孔隙结构特征及其控制因素 [J]. 岩性油气藏, 2016, 28(2): 16-23.
- XIONG Jian, LUO Danxu, LIU Xiangjun, et al. Characteristics and controlling factors of shale pore structure of Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2016, 28(2): 16-23.

(编辑 徐文明)