

doi: 10.12029/gc20200108

洪海涛, 田兴旺, 孙奕婷, 马奎, 李庚, 王云龙, 杨岱林, 彭瀚霖, 罗冰, 周刚, 薛玖火, 叶茂, 山述娇. 2020. 四川盆地海相碳酸盐岩天然气富集规律[J]. 中国地质, 47(1): 99–110.

Hong Haitao, Tian Xingwang, Sun Yiting, Ma Kui, Li Geng, Wang Yunlong, Yang Dailin, Peng Hanlin, Luo Bing, Zhou Gang, Xue Jiuhuo, YE Mao, Shan Shujiao. 2020. Hydrocarbon enrichment regularity of marine carbonate in Sichuan Basin[J]. Geology in China, 47(1): 99–110(in Chinese with English abstract).

四川盆地海相碳酸盐岩天然气富集规律

洪海涛¹, 田兴旺¹, 孙奕婷¹, 马奎¹, 李庚², 王云龙¹, 杨岱林¹,
彭瀚霖¹, 罗冰¹, 周刚¹, 薛玖火¹, 叶茂¹, 山述娇¹

(1. 中国石油西南天然气田分公司勘探开发研究院, 四川 成都 610041;

2. 川庆钻探工程有限公司勘探开发研究院, 四川 成都 610041)

摘要:四川盆地作为中国六大气区之一,为中国天然气快速发展作出了突出贡献。其海相克拉通沉积厚度达 4000~7000 m,天然气富集层系以海相碳酸盐岩为主。为了指导该盆地海相碳酸盐岩下一步天然气勘探的方向和目标,本文结合前人研究成果和多年来的勘探经验,从控制油气成藏的关键地质要素出发,系统总结了四川盆地海相碳酸盐岩天然气富集规律,认为:“源控性”——烃源岩在空间上的互补性分布总体控制了天然气的纵横向展布,纵向上距离烃源岩较近的储集层含气性普遍较好,平面上油气藏围绕优质烃源岩发育区(生气或油中心)呈环带状分布;“相控性”——有利的沉积相带对储层发育、天然气富集控制作用明显,即“相控储、储控藏”;岩溶作用改善了碳酸盐岩气藏储集层的储渗条件;古隆起继承性的发展控制了油气的早期运聚成藏;现今构造对天然气藏再调整、再分配的重要控制作用。综合应用天然气富集规律认识,四川盆地获得多个重大突破和发现,提交探明储量超万亿 m³,极大地促进了中国天然气的快速发展。

关键词:海相碳酸盐岩;天然气;岩溶;古隆起;富集规律;油气勘查工程;四川盆地

中图分类号: TE122.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2020)01-0099-12

Hydrocarbon enrichment regularity of marine carbonate in Sichuan Basin

HONG Haitao¹, TIAN Xingwang¹, SUN Yiting¹, MA Kui¹, LI Geng², WANG Yunlong¹,
YANG Dailin¹, PENG Hanlin¹, LUO Bing¹, ZHOU Gang¹, XUE Jiuhuo¹, YE Mao¹, SHAN Shujiao¹

(1. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. Geological Exploration Development Research Institute CNPC Chongqing Drilling Engineering Company Limited, Chengdu 610015, Sichuan, China)

Abstract: Sichuan Basin, as one of the six atmospheric regions in China, has made outstanding contribution to the rapid development of natural gas in China. The thickness of marine craton deposits is 4000–7000 m, and marine carbonate rocks are the main gas enrichment strata. In order to further guide the direction and target of natural gas exploration for marine carbonate rocks in the basin, the authors, based on previous research results and many years' exploration experience and starting with key geological

收稿日期: 2018-04-28; 改回日期: 2019-03-29

基金项目: 国家重大专项(2016ZX05004-005)及中国石油西南油气田分公司科技处项目(20170301-08)联合资助。

作者简介: 洪海涛, 男, 1971 年生, 高级工程师, 从事四川盆地油气地质勘探研究工作; E-mail: xhht@petrochina.com.cn。

通讯作者: 田兴旺, 男, 1988 年生, 工程师, 从事四川盆地油气地质勘探研究工作; E-mail: tianxinwang@petrochina.com.cn。

factors controlling hydrocarbon accumulation, have systematically summarized the regularity of natural gas enrichment in marine carbonate rocks in Sichuan Basin, and reached some conclusion: "source control" on the whole controls complementary distribution of source rocks in space, and vertical and horizontal distribution of natural gas shows that the gas-bearing property of reservoirs which are close to source rocks in vertical direction is generally better, and the horizontal distribution of oil and gas reservoirs around high-quality source rocks (gas or oil center) is circular; the "facies-controlled" favorable sedimentary facies zone has obviously controlled reservoir development and natural gas enrichment, that is, there exist "facies-controlled reservoir and reservoir-controlled reservoir"; the karstification improves carbonate rocks, i.e., improves reservoir permeability conditions of gas reservoirs; inheritance development of paleo-uplift controls the early migration and accumulation of oil and gas reservoirs; and present structure plays an important role in controlling the readjustment and redistribution of gas reservoirs. By comprehensively applying the regularity of natural gas enrichment, Sichuan Basin has made several major discoveries and breakthroughs and submitted proven reserves exceeding trillion square meters, which has greatly promoted the rapid development of natural gas in China.

Key words: Sichuan Basin; marine carbonate rocks; natural gas; karst; enrichment regularity exploration domains; paleo uplift; oil-gas exploratin engineering

About the first author: HONG Haitao, male, born in 1971, senior engineer, engages in petroleum geological exploration and research work in Sichuan Basin; E-mail: xhht@petrochina.com.cn.

About the communication author: TIAN Xingwang, male, born in 1988, engineer, engages in petroleum geological exploration and research work in Sichuan Basin; E-mail: tianxinwang@petrochina.com.cn.

Fund support: Supported by Major national projects (No. 2016ZX05004-005); PetroChina Southwest Oil and Gas Field Branch Science and Technology Branch Project (No. 20170301-08).

1 引 言

四川盆地作为中国六大气区之一(鄂尔多斯气区、四川气区、塔里木气区、柴达木气区、松辽气区、珠江口气区),为中国天然气快速发展作出了突出贡献。随着勘探理论和技术的不断进步,四川盆地大气田发现的数量和频率不断增大,天然气储量和产量保持快速增长,截至2017年底累计提交探明储量近3.5万亿 m^3 ,累计产量近5600亿 m^3 。四川盆地中部乐山—龙女寺古隆起地区发现了中国单体规模最大的海相碳酸盐岩整装气田—安岳特大型气田,提交探明储量8487.79亿 m^3 ,蜀南国家页岩气示范区:长宁—威远地区提交探明储量2673.59亿 m^3 ,川西地区中二叠统栖霞组获得重大勘探突破和发现,极大地展示出四川盆地海相碳酸盐岩良好的天然气资源勘探前景。

四川盆地是中国碳酸盐岩层系发育最全的盆地,天然气富集层系以海相碳酸盐岩为主,从前寒武系至三叠系均有分布(戴金星等,2003;杜金虎等,2014;徐春春等,2014;杨跃明等,2016)。从陆相到海相存在6套广覆式分布的烃源岩,烃源条件相对较好;发育上震旦统灯影组、下寒武统龙王庙组及中二叠统栖霞组等多套滩相+岩溶的优质储

层;存在多套间互式分布的泥页岩、膏盐岩和致密碳酸盐岩,区域盖层条件较为优越。经过60余年的持续研究和勘探实践,四川盆地海相碳酸盐岩天然气富集规律已初步形成了较为客观和系统的认识,杜金虎等(2014)、徐春春等(2014)、魏国齐等(2015)、杨跃明等(2016)研究了川中乐山—龙女寺古隆起震旦系—下古生界天然气成藏的基本条件和富集规律;杨光等(2016)分析了多旋回构造运动不同的表现形式和对沉积、成岩及成藏的控制作用。为了指导该盆地海相碳酸盐岩下一步天然气勘探的方向和目标,本文结合前人研究成果及勘探经验,从五个方面系统总结了四川盆地海相碳酸盐岩天然气成藏富集规律,论述如下。

2 烃源岩控制了天然气的宏观分布

四川盆地四套主要的海相烃源岩总体控制了克拉通海相沉积体系中天然气纵横向的分布。2013年4月,高石17井的钻探证实了下寒武统德阳—安岳克拉通内裂陷的存在(杜金虎等,2014;徐春春等,2014;魏国齐等,2015;杨跃明等,2016),改变了前人对筇竹寺组烃源岩分布形态和评价参数的认识,裂陷区烃源岩厚度50~450 m,有机质丰度0.50%~7.56%,生气强度20~120亿 m^3/km^2 ,第四次

资评震旦系—寒武系资源量较第三次资评增加近20倍。深层地震资料解释表明,德阳—安岳克拉通内裂陷分布受断裂控制。裂陷内部及两侧发育NW为主的张性断层,表现为断陷特征,边界断层断距大,且具有从北向南断距变小趋势,高石梯—威远以南断层不发育。受断裂控制克拉通内裂陷的形

成演化史分为3个阶段:始于震旦纪,发展于早寒武世早期,至早寒武世晚期消亡,其由川西海盆向克拉通盆地延伸,宽度50~300 km,南北长320 km,面积6万 km²。裂陷内灯影组厚度薄,下寒武统泥页岩填平补齐,地层厚度加大。裂陷内部发育下寒武统麦地坪组、筇竹寺组厚层优质烃源岩,其中筇竹寺

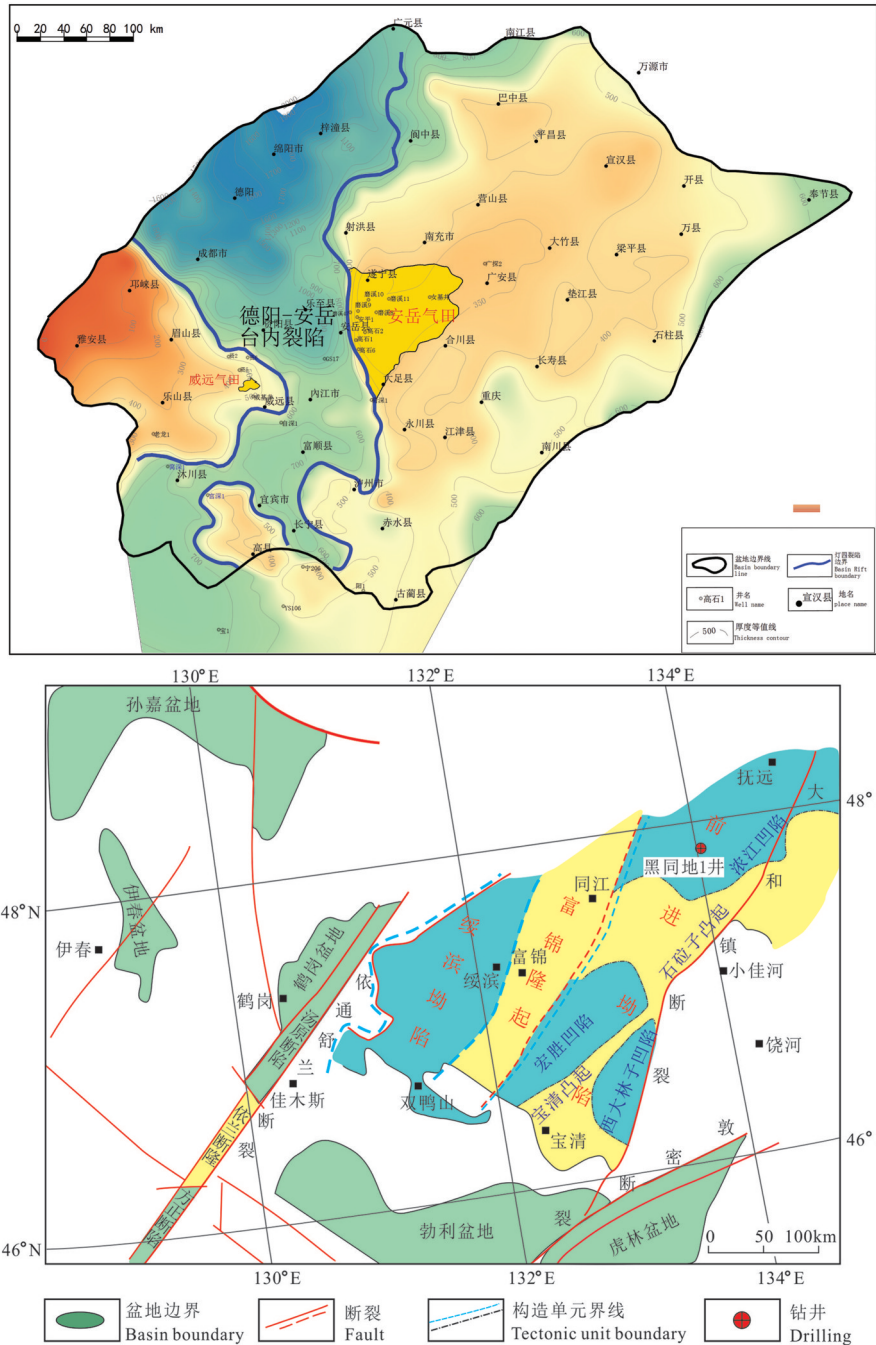


图1 四川盆地寒武系麦地坪组+筇竹寺组等厚图和筇竹寺组生气强度图

Fig.1 The isopach map of Cambrian Maidiping and Qiongzhusi Formation shale source rocks and the distribution of related gas reservoir in Sichuan Basin

组烃源岩厚度 300 m,是台地的 2 倍,平均有机碳含量 2.17%,为深水陆棚相腐泥型优质烃源岩。近期发现的安岳特大气田和早期发现的威远—资阳含气区均位于裂隙的两侧肩部,明显显示出天然气成藏的近源特征(图 1),截至 2018 年,安岳特大型气田已提交探明储量近万亿 m³。由成藏匹配可知,临近裂隙的边缘带成藏最有利,在安岳大气田发现后,四川盆地的勘探工作者沿着裂隙槽(优质烃源岩分布区)向南北扩展勘探领域(杜金虎等,2014;徐春春等,2014;魏国齐等,2015;杨跃明等,2016)。在盆地西南地区由于加里东运动的剥蚀作用下寒武统筇竹寺组厚度向西逐渐减薄,一般只有几十米至几米不等,生气强度低于 20 亿 m³/km²,对震旦系含气性有明显影响。

志留系泥质烃源岩平均厚度 203 m,有机碳含量 1.52%,生气强度 25 亿~30 亿 m³/km²。在川东腹地,石炭系直接覆盖在下伏志留系烃源岩厚值区,烃类运移距离短,近源成藏条件优越,川东地区的石炭系整体含气性好,截至 2015 年,已获得探明储量 2411.96 亿 m³。在川东—川中志留系剥蚀边缘,石炭系含气性比川东地区要差,仅获得一些小产气

井,显示了烃源岩展布对天然气富集的重要影响。

规模性分布的烃源岩控制了四川盆地大中型气田的宏观分布,纵向上,距离烃源岩较近的储集层,由于油气源供给相对充分,其气藏含气性普遍较好;平面上,油气藏围绕优质烃源岩发育区(生气或油中心)呈环带状分布。

3 沉积相带对天然气富集控制作用明显

碳酸盐岩储集性能的好坏和沉积相带关系密切。一般来说,相对高能的沉积相带是优质储层发育的前提条件。碳酸盐岩在沉积后,虽然会遭受多期破裂作用或岩溶作用的改造,储渗性能可能变好;但沉积时的岩相和岩性条件决定了后期改造的成效。若沉积时水体安静、能量较低,形成泥粉晶结构的致密碳酸盐岩,则后期建设性成岩作用很难将其改造为优质储层。相反,高能颗粒滩相,叠加后期合适的岩溶作用,则容易形成储渗性能俱佳的优质储层。究其原因,颗粒滩相往往存在原生孔隙,即使经过压实和胶结作用使其致密化,仍然可以保留部分储渗空间,为后期的流体溶蚀提供了必

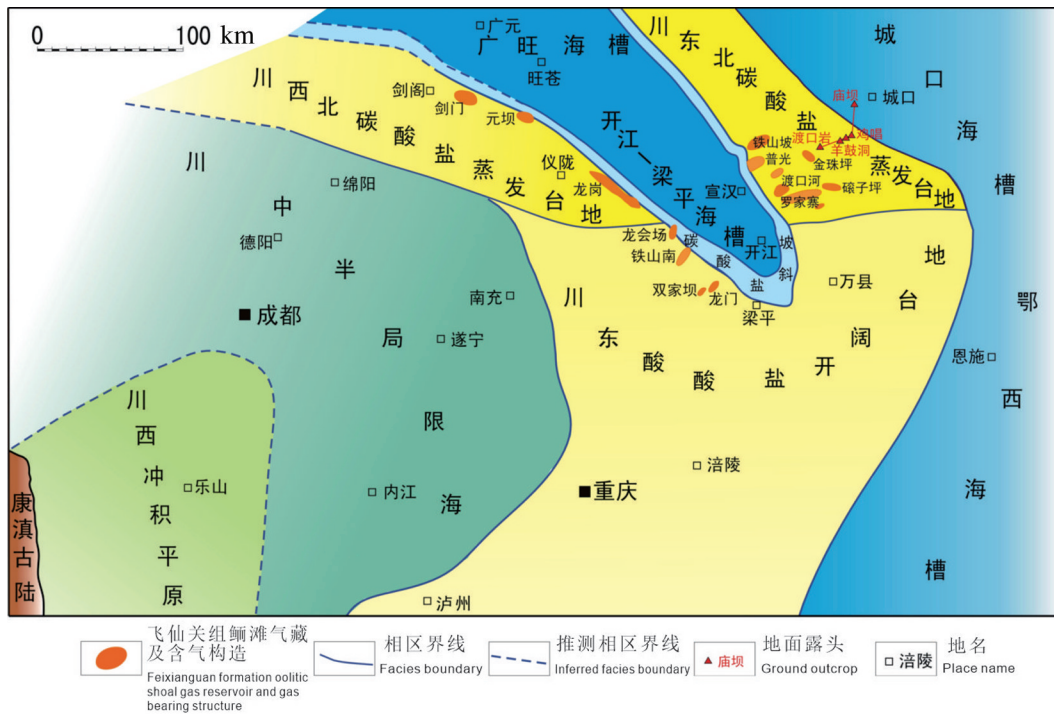


图 2 四川盆地三叠系飞仙关组沉积相图

Fig.2 The sedimentary facies map of Triassic Feixianguan Formation in Sichuan Basin

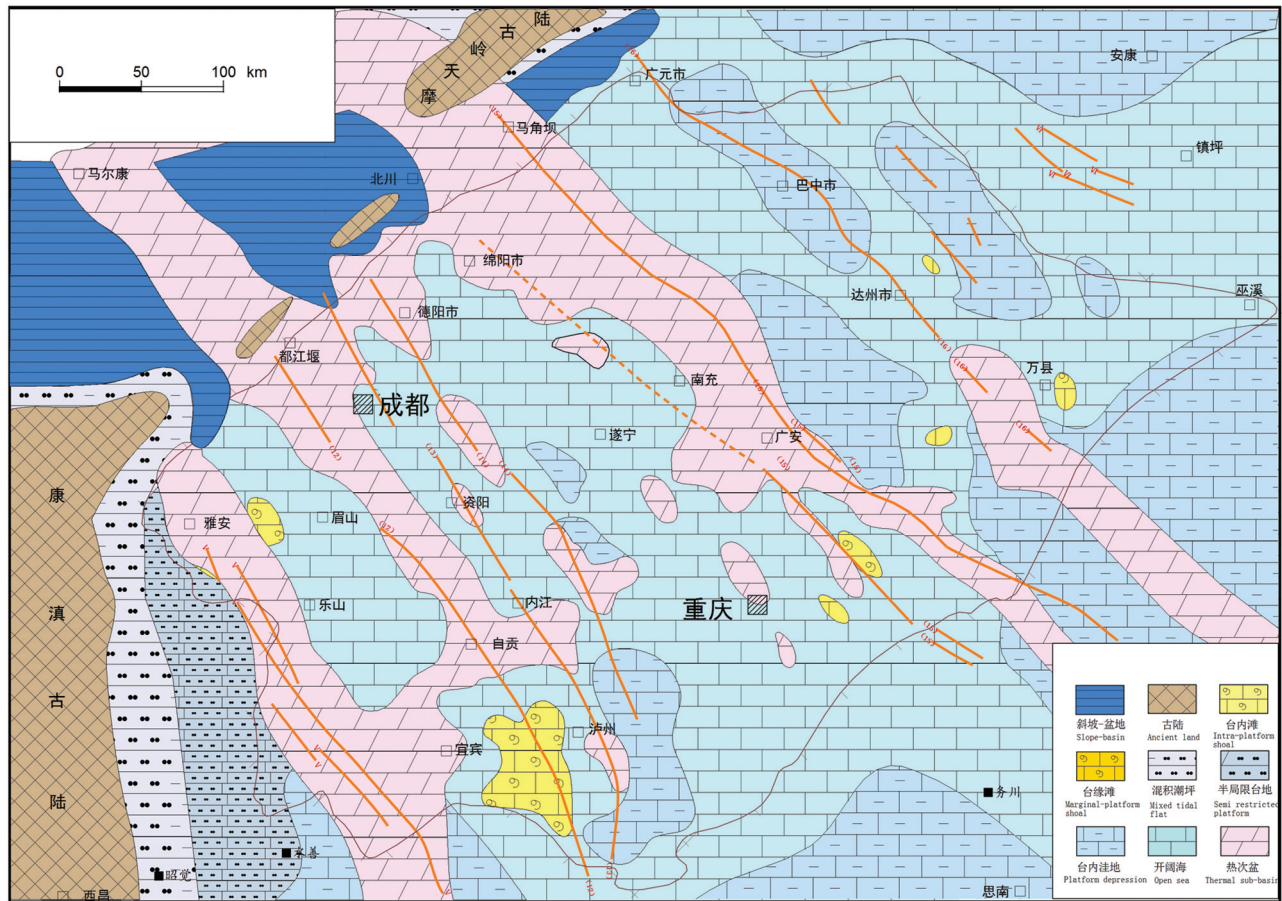


图3 四川盆地二叠系茅口组二段沉积相图

Fig.3 The sedimentary facies map of the second member of Permian Maokou Formation in Sichuan Basin

要的流通条件。

四川盆地沉积体系多,在海相碳酸盐岩层系内,主要发育碳酸盐岩台地相沉积,且以台内相为主,总体上沉积分异小,导致台内颗粒滩体在纵向上迁移变化快,使储层常呈较局限的透镜状产出,气藏多以中小型为主,二叠系生屑滩气藏、嘉陵江组和雷口坡组的台内滩相气藏多属此列。但如果沉积相在横向上具有较大的分异,在深浅水的过渡相带,则会形成厚度较大、平面上具定向连续的储层发育带,后期的天然气也在此基础上富集而成藏,形成颇具规模的环深水相带大型气藏群(雷卞军等,1994;罗平等,2006;王一刚等,2006,2007,2008,2009;曾伟等,2007;洪海涛等,2008),如二叠系、三叠系环开江—梁平海槽台地边缘带礁滩气藏群即为此例(图2)。川中乐山—龙女寺古隆起已发现的安岳特大型气田、威远气田及资阳含气构造呈扇状的、鼻状的展布。现今构造低部位大规模成藏

的重要机制可概括为古隆起及其控制的早期古隆起、古丘滩体储层、岩性—地层古圈闭“四古”要素的时空有效配置。安岳特大型气田受“四古”要素控制,在古隆起现今低部位岩性—地层圈闭大规模成藏。德阳—安岳两侧发育灯影组克拉通内镶边台地,丘滩体沿台缘带呈U型展布,面积达 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$;龙王庙组发育缓坡“双颗粒滩”,滩体沿桐湾期碳酸盐建隆展布,面积达 $8 \times 10^4 \text{ km}^2$ (罗冰等,2015)。

近年来,有学者在二叠系茅口组评价研究中,提出了“热次盆相”的概念(何幼斌等,1996;蒋志斌等,2009)。即沉积盆地局部范围在区域构造运动背景下,受到热异常事件影响,改变了原有的沉积环境,形成与热异常相关的沉积建造,此局部范围称之为热次盆。阶段研究认为茅口组“热次盆相带”呈北西—南东向贯穿盆地,与北西向基底断裂走向一致,面积约 1.8 万 km^2 (川中—川西区块 1.3 万 km^2) (图3)。该相带岩性表现出“硅云组合”的特

征:野外剖面上白云岩夹层状燧石或条带状燧石团块;薄片下白云岩富含硅质,硅质充填在白云石溶孔溶洞中;可见含热源物质的热水矿物如石英、黄铁矿等。地球化学分析认为,该相带白云岩、硅质白云岩和层状硅质岩均为热水成因。早二叠世晚期,四川盆地处在拉张背景,来自于基底断裂的热水,来源于深部岩浆流体的热液,携带大量化学活动性强的物质组分,释放出大量的热能,促使流体与围岩发生各种物理化学反应,沉积或交代形成层状硅质白云岩、白云岩,同时发生埋藏溶解作用,改善储层的储集性能。白云岩以细—中晶为主,溶蚀孔洞发育,厚度在5~35 m,具有良好的储集性及含气性。“热次盆相”的提出(何幼斌等,1996),以及茅口组层状孔隙性白云岩的发现,改变了人们对二叠系茅口组仅发育岩溶缝洞型储层的固有认识,开启了一个中二叠统勘探的潜在领域。

总之,四川盆地碳酸盐岩沉积相带对储层发育、天然气富集的控制作用显著,即“相控储、储控藏”。大中型气藏均处于有利的沉积相带,因此,寻找有利储层发育的沉积相带仍是天然气勘探的重点方向。

4 表生岩溶改善了碳酸盐岩气藏的储渗条件

岩溶作用是碳酸盐岩形成储集空间最主要、最关键的成岩作用,是有利储层发育区预测需要考虑

的重要因素。岩溶最早的涵义仅指“喀斯特”作用,现在通常指沉积物在沉积之后发生的所有的溶蚀作用的总和,按溶蚀特征可分为3类:同生—准同生岩溶、表生岩溶、埋藏岩溶(雷怀彦等,1992;强子同,1998;王士峰等,1999)。

同生、准同生岩溶属于早成岩阶段岩溶,也称之为层间岩溶,指沉积物在沉积后尚未完全固结之前产生的溶蚀作用,此时沉积物尤其是水体较浅的滩体尚未脱离近地表环境,在大气淡水的作用下,容易产生选择性溶蚀而形成早期孔隙。同生岩溶往往产生于常暴露地表的地貌高部位,溶蚀规模小,形成的孔隙在埋藏过程中往往被胶结,对天然气储集空间的贡献有限。埋藏岩溶则指沉积物已脱离了地表环境影响并已固结情况下,在埋藏环境中产生的岩溶作用。埋藏岩溶需要地层水流动才能发生,在流体释压地带,如断裂破碎带和裂缝集中带表现显著。在保存条件好、构造应力弱、断裂不发育的地区寻找埋藏溶蚀有利区,目前还缺乏有效的手段。

在3类岩溶作用中,表生岩溶作用可以形成大规模连片分布的储集空间,对天然气勘探具有重要价值。表生岩溶也叫“喀斯特”岩溶,指沉积物在经历了埋藏阶段固结成岩后,又被重新抬升至地表,地层在遭受剥蚀的同时发生地表水溶蚀作用,也称之为风化壳岩溶。表生岩溶作用的范围比较广,和地层抬升露出水面遭受剥蚀的范围一致,四川盆地

表1 四川盆地碳酸盐岩表生岩溶作用期次及对储层的影响分析

Table 1 The analysis table of supergene karstification period and its influence on reservoir in Sichuan Basin

表生岩溶期次	对应风化面	最大剥蚀厚度/m	持续时间/Ma	对储集空间改造趋势	成因分析	有利储层控制要素
桐湾期	桐湾运动—震顶风化面	300	10	建设性	碳酸盐岩厚度大,相对质纯,溶蚀孔洞有利保存	岩溶斜坡有利溶蚀
加里东期	加里东运动—下古风化面	1000	> 100	双面性	碳酸盐和碎屑岩互层分布,碳酸盐不溶物含量高,地貌高差小	在探寻古隆起核部风化岩溶储层的同时,积极寻找相控孔隙性储层
云南期	云南运动—石炭系风化面	100	15	建设性	地层厚度薄,表生岩溶和埋藏岩溶改造彻底	地层残留厚度大于10 m区域
东吴期	东吴运动—阳新统风化面	150	6	建设性	厚层灰岩,性脆,易产生裂缝,顺缝溶蚀产生溶洞	裂缝易产生的各种构造转折部位和滩相的叠合区
印支期	印支期运动—雷口坡组风化面	400~600	9	双面性	碳酸盐岩和膏盐岩互层分布,垮塌易充填	优先选择颗粒滩相储层发育区

* 剥蚀厚度和持续时间由地层缺失程度估算,仅供参考。

碳酸盐岩层系的5期表生岩溶作用范围均是盆地级别的。

四川盆地碳酸盐岩层系表生岩溶可识别出5期,相对应5个古风化面(表1)。5期表生岩溶与盆地内几个重要的产层都有密切的关系。上面提到四川盆地碳酸盐岩沉积以台内相为主,沉积分异小,滩体不连续。但表生岩溶作用可以使风化壳附近的储集层受到建设性改造,表生岩溶侵蚀改造,使碳酸盐岩大面积产生溶蚀孔洞,形成连片的储集层,并改善储层孔渗条件。改变滩体储层不连续的局面,形成一定区域内分布的发育条件相近的连片储集层。石炭系储层在区域上大面积展布实际上早已超越了沉积滩体的控制,就是因为其顶部的风化岩溶作用对储层的大面积改造所形成,也造就了气藏群在平面上的规模分布。中二叠统有利储层受构造作用和岩溶作用共同影响,沿着断裂带裂缝化作用+深成岩溶形成的碳酸盐岩储集体,储层发育区主要为裂缝易产生的各种构造转折部位和滩

相的叠合区。

总体来说,表生岩溶对四川盆地碳酸盐岩储集空间的发育做出了巨大贡献,开启了更为广泛的后期埋藏溶蚀的流体通道。其发育程度还可通过岩溶地貌恢复等手段进行预测,具备较强的可操作性,对天然气勘探中区带评价和目标评选意义重大。

5 古隆起继承性发展控制油气早期运聚成藏

古隆起对天然气的富集控制作用早已为石油地质家们所认知,也为勘探实践所证实。如果古隆起形成时间早、规模大、继承性强,将是寻找大天然气田的最有利区带。四川盆地存在两期大型古隆起:加里东期乐山—龙女寺和印支期泸州—开江古隆起。

乐山—龙女寺古隆起在1970年代发现之后,一直受到勘探家们所重视,开展了多轮的研究和勘探。“八五”期间,宋文海等在国家攻关课题中对乐山—龙女寺古隆起开展了系统的研究和描述,评

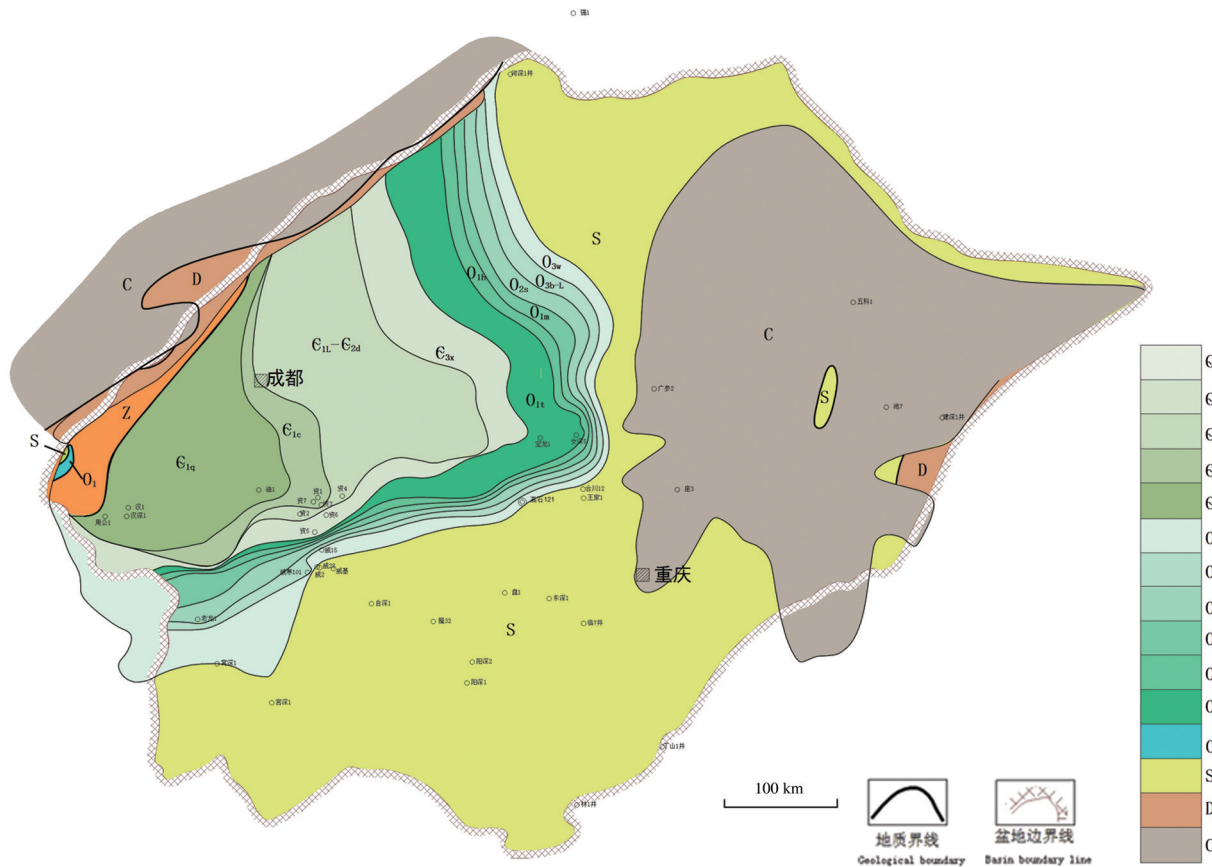


图4 四川盆地二叠系沉积前古地质图
Fig.4 The paleogeological map of predepositional Permian in Sichuan Basin

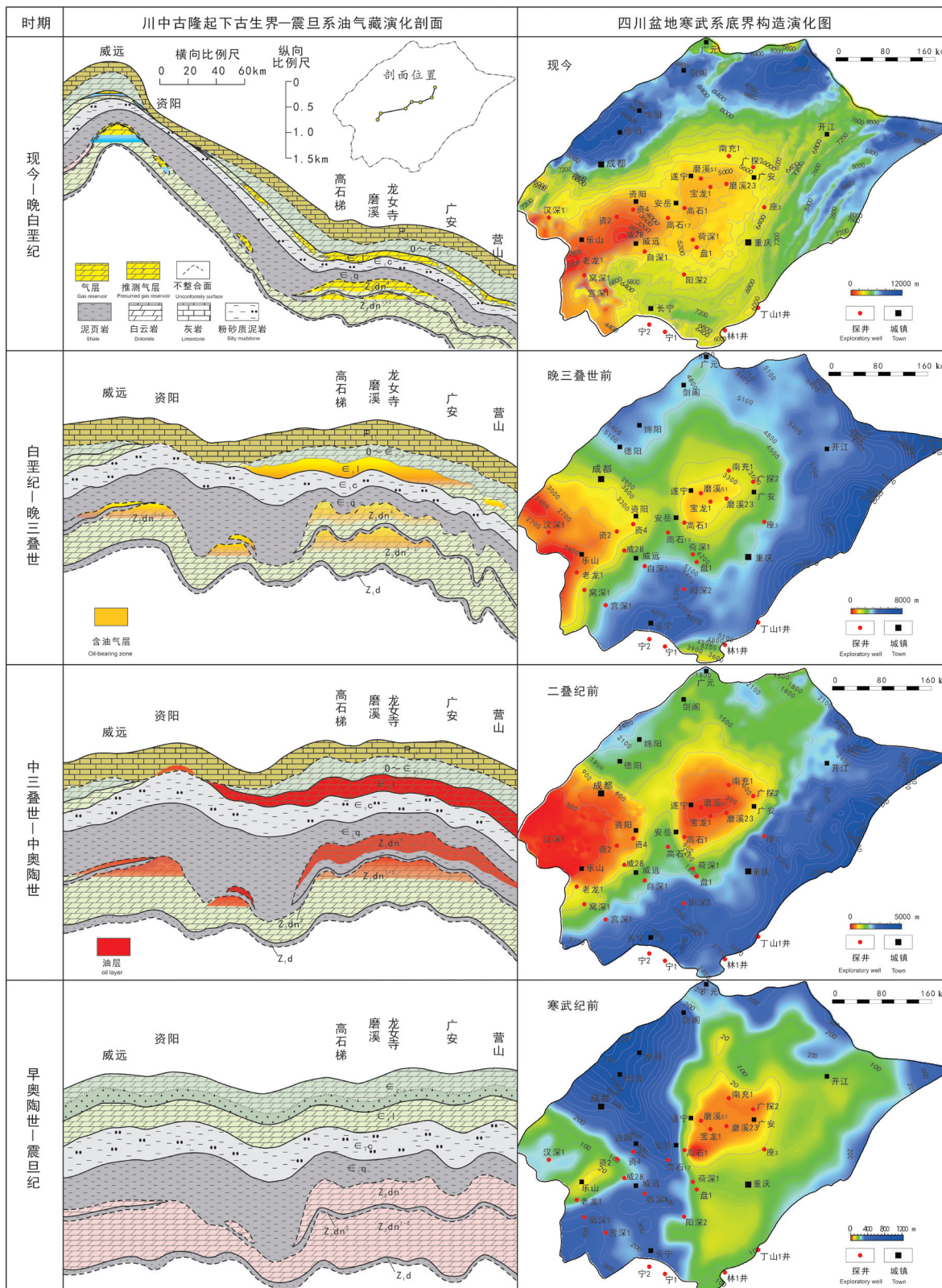


图5 四川盆地乐山—龙女寺古隆起高石梯—磨溪天然气藏演化和构造演化图

Fig.5 The evolution of oil and gas reservoirs and tectonics of Gaoshiti-Moxi area in Leshan-Longnusi paleouplift of Sichuan Basin

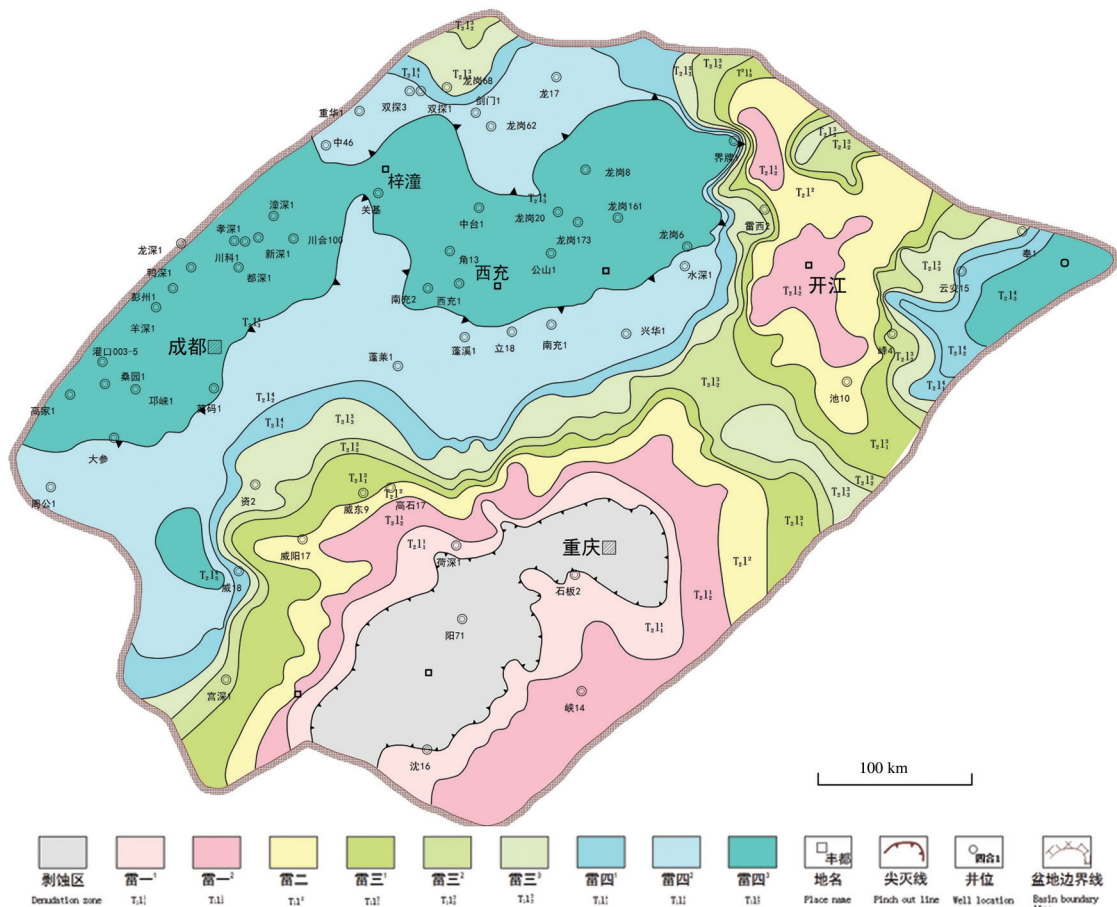


图6 四川盆地上三叠统沉积前古地质图

Fig.6 The paleogeological map of predepositional Upper Triassic in Sichuan Basin

价了含天然气前景。“九五”期间徐世琦和“十一五”期间洪海涛等又开展了两轮攻关研究,重新刻画了古隆起的分布形态(图4),提出了勘探部署建议。在科研工作者持续不断的攻关研究支持下,在勘探家们不屈不挠的探索下,“十二五”期间终于获得重大突破,发现了中国单体规模最大特大型整装气田—安岳气田,成为古隆起勘探的经典案例,古隆起对天然气的运移富集作用再次得到确认(雷卞军等,1994;何幼斌等,1996;王一刚等,2007;蒋志斌等,2009;洪海涛等,2011;杜金虎等,2014;徐春春等,2014;魏国齐等,2015;杨跃明等,2016;杨光等,2016)。加里东运动形成了乐山—龙女寺大型古隆起,奠定了震旦系天然气富集带形成的构造基础。古隆起自形成后,虽经历多期构造运动,除威远、资阳地区后期构造变形强烈外,磨溪至龙女寺一带构造变形较弱,古隆起形态较完整,利于天然气的聚

集与保存;晚奥陶世—早志留世发生的多期次构造运动,古隆起轴部奥陶系乃至寒武系遭受剥蚀,形成了多期不整合面,利于岩溶储层形成及天然气运移通道;古隆起轴部的震旦系—下寒武统烃源岩到二叠纪末进入生油窗,使该区天然气资源得以最大限度的保存。晚燕山—喜山期,古气藏发生调整改造,成为现今多类型气藏分布格局。

乐山—龙女寺古隆起形成后一直继承性发展,始终为天然气运移指向部位(图5),且后期变形弱,天然气藏形成后可长期保持。可以说,安岳大气田的形成,是各种优越成藏条件的最佳匹配而成,其中古隆起的存在则是最关键的因素(洪海涛等,2011;杜金虎等,2014;徐春春等,2014;魏国齐等,2015;杨跃明等,2016;杨光等,2016)。

印支期,泸州—开江古隆起开始形成,从四川盆地上三叠统沉积前古地质图(图6)可以看出,泸

表2 四川盆地气藏类型统计(截至2015年)
Table 2 Statistical table of gas reservoir types
in Sichuan Basin

气藏圈闭类型	气藏		储量情况	
	数量/个	比例/%	储量/(10 ⁸ m ³)	比例/%
构造	277	87.66	5068.83	25.26
岩性	11	3.48	1196.66	5.96
复合	28	8.86	13797.68	68.77
合计	316	100	20063.17	100

洲、开江地区雷口坡组的剥蚀程度最强烈。泸州古隆起剥蚀到嘉陵江组、开江古隆起剥蚀到雷一段、雷二段,向古隆起两侧地层保存厚度逐渐增大。这个期间,志留系烃源岩开始大量生烃,以志留系为烃源的石炭系则围绕开江古隆起形成范围较大的古油藏(或古气藏)。

古天然气藏受后期的构造改造后调整为现今的条带状气藏群。目前已探明的石炭系大中型气田基本上分布在古隆起核部和上斜坡部位。近期,有学者提出开江古隆起在前震旦纪已有雏形,即基底隆起。格架剖面上显示在隆起区震旦系沉积减薄,向隆起核部出现超覆现象,向两侧凹陷区震旦系加厚,对上覆寒武系的沉积也产生一定影响,影响范围在盆地内部面积约1万km²,包括了黄龙场、达州、开江一带。这一发现引起了学者们的兴趣,目前,中国石油西南天然气田公司正在该地区开展工作,希望能在川东地区震旦系一下古生界领域取得突破(杨跃明等,2016)。

另外,印支期泸州古隆起的形成对下三叠统天然气运聚的控制作用也十分明显,该观点前人已作了大量详细论证,本文不再赘述。

6 现今构造控制了天然气藏现今分布格局

在天然气富集规律的研究中,前述烃源岩、沉积相、古岩溶、古隆起均在宏观上影响着天然气的富集趋势,对含天然气有利区带评价意义重大。但在一个有利区带中寻找具体的天然气藏,现今构造则成为优先考虑的决定因素。所以,在目标评价研究中,圈闭识别和圈闭评价则成为重中之重。

天然气运移的特性决定了其在构造圈闭(主要指背斜圈闭)中是最易聚集的。在目前的勘探技术

条件下,构造圈闭也是相对简单、最易识别的圈闭类型,勘探成效也是比较好的。从表2可以看出,截至2015年底,四川盆地已发现的316个气藏圈闭中,构造圈闭(主要是背斜圈闭)占了绝大多数,达87.66%;非背斜圈闭气藏也发育在正向构造背景中,并且气水分异程度往往和构造圈闭的闭合度呈正比。规模较大、相对完整的现今构造圈闭发育的地方也常是大中型气田所赋存的地方,如威远气田、安岳特大型气田、五百梯气田、罗家寨气田等,无不具有正向构造背景。在整体为斜坡的构造背景中,天然气也可在斜坡的局部高点聚集形成小型气藏,若数量众多可形成一定规模的气藏群,如龙岗礁、滩气藏群。但由于斜坡带气水分异不彻底,开发难度较大。川中乐山—龙女寺古隆起已发现的安岳特大型气田、威远气田及资阳含气构造呈扇状的、鼻状的展布。现今构造低部位大规模成藏的重要机制可概括为古裂陷及其控制的早期古隆起、古丘滩体储层、岩性—地层古圈闭“四古”要素的时空有效配置。安岳特大型气田受“四古”要素控制,在古隆起现今低部位岩性—地层圈闭大规模成藏。

在四川盆地常规气藏中,纯粹靠岩性封堵,连局部高点都不存在的气藏类型非常少见。从已发现的气藏、气田或含气构造的总体分布特征来看,与现今构造格局高度吻合,显示了现今构造对天然气藏再调整、再分配的重要控制作用。

7 结 论

四川盆地是中国大型叠合盆地,下伏海相克拉通盆地沉积厚度达4000~7000m,天然气储产量多来自于海相碳酸盐岩中,以产天然气为主。天然气富集规律由多种因素联合控制,其中构造因素为主线,贯穿了天然气生成、运移和聚集的各个环节。加强新区新领域的综合评价研究,强化风险勘探目标论证和部署,四川盆地天然气勘探将会迎来新的更大的突破。

“源控性”—烃源岩在空间上的互补性分布总体控制了大油气田的纵横向展布,纵向上,距离烃源岩较近的储集层,由于优质烃源岩供给相对充分,其气藏含气性普遍较好,平面上,天然气藏围绕优质烃源岩(生气或油中心)呈环带状分布;“相控性”四川盆地碳酸盐岩沉积相带对储层发育、天然

气富集的控制作用显著,即“相控储、储控藏”;5期表生岩溶整体控制了重要产层储集空间的发育;古隆起控制了油气的早期运聚,现今构造对天然气藏再调整、再分配的重要控制作用。

References

- Dai Jinxing, Chen Jianfa, Zhong Ningning. 2003. Large Gas Fields in China and Their Gas Sources[M]. Beijing: Science Press, 83–163 (in Chinese).
- Du Jinhu, Wang Zecheng, Zou Caineng, Xu Chunchun, Shen Ping, Zhang Baomin, Jiang Hua, Huang Shipeng. 2016. Discovery of intra-cratonic rift in the Upper Yangtze and its control effect on the formation of Anyue giant gas field[J]. *Acta Petroli Sinica*, 37(1): 1–16(in Chinese with English abstract).
- Du Jinhu, Zou Caineng, Xu Chunchun, He Haiqing, Shen Ping, Yang Yueming, Li Yalin, Wei Guoqi, Wang Zecheng, Yang Yu. 2014. 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*, 41(3): 267–277 (in Chinese with English abstract).
- He Youbin, Feng Zengzhao. 1996. Origin of Fine-to Coarse-grained Dolostones of Lower Permian in Sichuan Basin and its Peripheral Regions[J]. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 18(4): 5–20 (in Chinese with English abstract).
- Hong Haitao, Wang Yigang, Yang Tianquan, Wen Yingchu, Xia Maolong. 2008. Sedimentary facies of changxing formation and distribution of organic reef gas reservoirs in northern sichuan basin[J]. *Natural Gas Industry*, 28(1): 38–41(in Chinese with English abstract).
- Hong Haitao, Xie Jirong, Wu Guoping, Liu Xin, Xia Maolong. 2011. Potential of gas exploration in the Sinian reservoirs, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 31(11): 37–41 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Zhibin, Wang Xingzhi, Zeng Deming, Lu Tiemei, Wang Baoquan, Zhang Jinyou. 2009. Constructive diagenesis and porosity evolution in the Lower Permian Qixia Formation of Northwest Sichuan[J]. *Geology in China*, 36(1): 101–109(in Chinese with English abstract).
- Lei Bianjun, Qiang Zitong, Wen Yingchu. 1994. Dolomitization of the upper permian organic reefs in eastern Sichuan and its adjacent areas[J]. *Geological Review*, 11(6): 158–165(in Chinese with English abstract).
- Lei Huaiyan, Zhu Lianfang. 1992. Origin of the dolostones of Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, (2): 69–78 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shugen, Huang Wenming, Zhang Changjun, Zhao Xiafei, Dai Sulan, Zhang Zhijing, Qin Chuan. 2008. Research status of dolomite genesis and its problems in Sichuan Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 20(2): 6–15 (in Chinese with English abstract).
- Luo Bing, Luo Wenjun, Wang Wenzhi, Wang Zhihong, Shan Shujiao. 2015. Formation mechanism of the Sinian natural gas reservoir in the Leshan–Longnvs Paleo-uplift, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 26(3): 444–455. (in Chinese with English abstract).
- Luo Bing, Yang Yuoming, Luo Wenjun, Wen Long, Wang Wenzhi, Chen Kang. 2015. Controlling factors and distribution of reservoir development in Dengying Formation of palco-uplift in central Sichuan Basin[J]. *Acta Petroli Sinica*, 36(4): 416–426(in Chinese with English abstract).
- Luo Ping, Su Liping, Luo Zhong, Cui Jinggang, Yan Jihong. 2006. Application of laser micro-sampling technique to analysis of C and O isotopes of oolitic dolomites in Feixianguan Formation, Northeast Sichuan[J]. *Geochimica*, 35(3): 325–330(in Chinese with English abstract).
- Qiang Zitong. 1998. Carbonate Reservoir Geology[M]. China Dongying: University of Petroleum Press(in Chinese).
- Wang Shifeng, Xiang Fang. 1999. The origin of the dolostones from the Sinian Dengying Formation in the Ziyang district, Sichuan[J]. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 19(3): 21–29(in Chinese with English abstract).
- Wang Yigang, Hong Haitao, Xia Maolong, Fan Yi, Wen Yingchu. 2008. Exploration of reef-bank gas reservoirs surrounding permian and triassic troughs in Sichuan basin[J]. *Natural Gas Industry*, 28(1): 22–27 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yigang, Wen Yingchu, Hong Haitao, Xia Maolong, Song Shujun. 2006. Dalong formation found in kaijiang-liangping oceanic trough in the sichuan basin[J]. *Natural Gas Industry*, 26(9): 32–36 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yigang, Wen Yingchu, Hong Haitao, Xia Maolong, Zhan Jing, Song Shujun, Liu Huayi. 2006. Petroleum geological characteristics of deep water deposits in Upper Permian–Lower Triassic trough in Sichuan basin and adjacent areas[J]. *Oil & Gas Geology*, 27(5): 702–714(in Chinese with English abstract).
- Wang Yigang, Wen Yingchu, Hong Haitao, Xia Maolong, He Tingting, Song Shujun. 2007. Diagenesis of Triassic Feixianguan Formation in Sichuan Basin, Southern China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 25(6): 831–839(in Chinese with English abstract).
- Wang Yigang, Wen Yingchu, Hong Haitao, Xia Maolong, Fan Yi, Wen Long, Kong Lingxia, Wu Chuanhong. 2009. Carbonate slope facies sedimentary characteristics of the Late Permian to Early Triassic in northern Sichuan Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 11(2): 143–156(in Chinese with English abstract).
- Wei Guoqi, Yang Wei, Du Jinhu, Xu Chunchun, Zou Caineng, Xie Wuren, Wu Saijun, Zeng Fuying. 2015. 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*, 42(3): 257–265(in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- Xu Chunchun, Shen Ping, Yang Yueming, Luo Bing, Huang Jianzhang, Jiang Xingfu, Xie Jirong, Cen Yongjing. 2014. Accumulation conditions and enrichment patterns of natural gas in the Lower Cambrian Longwangmiao Fm reservoirs of the Leshan-Longnusi paleohigh, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 34(3): 1-7(in Chinese with English abstract).
- Yang Guang, Li Guohui, Li Nan, Chen Shuangling, Wang Hua, Xu Liang. 2016. Hydrocarbon accumulation characteristics and enrichment laws of multi-layered reservoirs in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry. 36(11): 1-11(in Chinese with English abstract).
- Yang Yueming, Wen Long, Luo Bing, Song Jiarong, Chen Xiao, Wang Xiaojuan, Hong Haitao, Zhou Gang, He Qinglin, Zhang Xiaoli, Zhong Jiayi, Liu Ran, Shan Shujiao. 2016. Sedimentary tectonic evolution and reservoir-forming conditions of the Da zhou-Kaijiang paleo-uplift, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 36(8): 1-10(in Chinese with English abstract).
- Yang Yueming, Wen Long, Luo Bing, Wang Wenzhi, Shan Shujiao. 2016. Hydrocarbon accumulation of Sinian natural gas reservoirs, Leshan-Longnusi paleohigh, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 43(2): 179-189(in Chinese with English abstract).
- Zeng Wei, Huang Xianping, Yang Yu, Wang Xingzhi. 2007. The origin and distribution of dolostone in Feixianguan Formation in Lower Triassic Series, northeast Sichuan[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 29(1): 19-22(in Chinese with English abstract).
- 戴金星, 陈践发, 钟宁宇. 2003. 中国大气田及其气源[M]. 北京: 科学出版社, 83-163.
- 杜金虎, 汪泽成, 邹才能, 徐春春, 沈平, 张宝民, 姜华, 黄士鹏. 2016. 上扬子克拉通内裂隙的发现及对安岳特大型气田形成的控制作用[J]. 石油学报, 37(1): 1-16.
- 杜金虎, 邹才能, 徐春春, 何海清, 沈平, 杨跃明, 李亚林, 魏国齐, 汪泽成, 杨雨. 2014. 川中古隆起龙工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, 41(3): 267-277.
- 何幼斌, 冯增昭. 1996. 四川盆地及其周缘中二叠统细-粗晶白云岩成因探讨[J]. 江汉石油学院学报, 18(4): 5-20.
- 洪海涛, 王一刚, 杨天泉, 文应初, 夏茂龙. 2008. 川北地区长兴组沉积相和生物礁气藏分布规律[J]. 天然气工业, 28(1): 38-41.
- 洪海涛, 谢继容, 吴国平, 刘鑫, 范毅, 夏茂龙. 2011. 四川盆地震旦系天然气勘探潜力分析[J]. 天然气工业, 31(11): 37-41.
- 蒋志斌, 王兴志, 曾德铭, 鲁铁梅, 王保全, 张金友. 2009. 川西北中二叠统栖霞组有利成岩作用与孔隙演化[J]. 中国地质, 36(1): 101-109.
- 雷卞军, 强子同, 文应初. 1994. 川东及邻区上二叠统生物礁的白云岩化[J]. 地质论评, 11(6): 158-165.
- 雷怀彦, 朱莲芳. 1992. 四川盆地震旦系白云岩成因研究[J]. 沉积学报, (2): 69-78.
- 刘树根, 黄文明, 张长俊, 赵霞飞, 戴苏兰, 张志敬, 秦川. 2008. 四川盆地白云岩成因的研究现状及存在问题[J]. 岩性天然气藏, 20(2): 6-15.
- 罗冰, 罗文军, 王文之, 王志宏, 山述娇. 2015. 四川盆地乐山-龙女寺古隆起震旦系气藏形成机制[J]. 天然气地球科学, 26(3): 444-455.
- 罗冰, 杨跃明, 罗文军, 文龙, 王文之, 陈康. 2015. 川中古隆起灯影组储层发育控制因素及展布[J]. 石油学报, 36(4): 416-426.
- 罗平, 苏立萍, 罗忠, 崔京钢, 闫继红. 2006. 激光显微取样技术在川东北飞仙关组鲕粒白云岩碳氧同位素特征研究中的应用[J]. 地球化学, 35(3): 325-330.
- 强子同. 1998. 碳酸盐岩储层地质学[M]. 东营: 石油大学出版社.
- 王士峰, 向芳. 1999. 资阳地区震旦系灯影组白云岩成因研究[J]. 岩相古地理, 19(3): 21-29.
- 王一刚, 洪海涛, 夏茂龙, 范毅, 文应初. 2008. 四川盆地二叠、三叠系环海槽礁、滩富气带勘探[J]. 天然气工业, 28(1): 22-27.
- 王一刚, 文应初, 洪海涛, 夏茂龙, 范毅, 文龙, 孔令霞, 武川红. 2009. 四川盆地北部晚二叠世-早三叠世碳酸盐岩斜坡相带沉积特征[J]. 古地理学报, 11(2): 143-156.
- 王一刚, 文应初, 洪海涛, 夏茂龙, 何颀婷, 宋蜀筠. 2007. 四川盆地三叠系飞仙关组气藏储层成岩作用研究[J]. 沉积学报, 25(6): 831-839.
- 王一刚, 文应初, 洪海涛, 夏茂龙, 宋蜀筠. 2006. 四川盆地开江-梁平海槽内发现大隆组[J]. 天然气工业, 26(9): 32-36.
- 王一刚, 文应初, 洪海涛, 夏茂龙, 张静, 宋蜀筠, 刘划一. 2006. 四川盆地及邻区上二叠统一下三叠统海槽的深水沉积特征[J]. 石油与天然气地质, 27(5): 702-714.
- 魏国齐, 杨威, 杜金虎, 徐春春, 邹才能, 谢武仁, 武赛军, 曾富英. 2015. 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, 42(3): 257-265.
- 徐春春, 沈平, 杨跃明, 罗冰, 黄建章, 江兴福, 谢继容, 岑永静. 2014. 乐山-龙女寺古隆起震旦系一下寒武统龙王庙组天然气成藏条件与富集规律[J]. 天然气工业, 34(3): 1-7.
- 杨光, 李国辉, 李楠, 陈双玲, 汪华, 徐亮. 2016. 四川盆地多层系天然气成藏特征与富集规律[J]. 天然气工业, 36(11): 1-11.
- 杨跃明, 文龙, 罗冰, 宋家荣, 陈骁, 王小娟, 洪海涛, 周刚, 何青林, 张晓丽, 钟佳倚, 刘冉, 山述娇. 2016. 四川盆地达州-开江古隆起沉积构造演化及天然气成藏条件分析[J]. 天然气工业, 36(8): 1-10.
- 杨跃明, 文龙, 罗冰, 王文之, 山述娇. 2016. 四川盆地乐山-龙女寺古隆起震旦系天然气成藏特征[J]. 石油勘探与开发, 43(2): 179-189.
- 曾伟, 黄先平, 杨雨, 王兴志. 2007. 川东北下三叠统飞仙关组白云岩成因及分布[J]. 西南石油大学学报, 29(1): 19-22.

附中文参考文献