

[文章编号] 1671-9727(2009)06-0669-06

四川盆地中西部雷口坡组油气地质条件及勘探方向探讨

汪 华^{1,2} 刘树根¹ 秦 川¹ 张长俊¹ 王国芝¹ 李德星¹ 代寒松¹

(1.“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室(成都理工大学),成都 610059;

2. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院,成都 610051)

[摘要] 四川盆地中三叠统雷口坡组迄今为止只发现了中坝和磨溪两个大中型气田,但近年来,钻井过程中于雷口坡组油气显示活跃,展示了良好的勘探前景。盆地中西部雷口坡组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;其沉积时该区地壳处于拉张状态。雷口坡组有良好的烃源岩条件,多种类型的优质储层(礁滩、热液白云岩、古喀斯特储层等),有膏岩层、泥岩层的良好封隔,具有形成大中型气藏的地质条件。寻找礁滩储层、热液白云岩储层和古喀斯特储层气藏是四川盆地中西部雷口坡组的勘探新方向,其重点勘探地区应是龙门山前缘(川西)地区。然而,雷口坡组源储距离较大,必须要有断穿龙潭组和下三叠统的断层裂缝系统作为运移通道,所以在预测有利勘探区时,应重视天然气输导体系的研究。

[关键词] 四川盆地;中三叠统;雷口坡组;天然气;油气地质条件;勘探方向

[分类号] TE122 **[文献标识码]** A

中三叠统是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^[1]。该层段以开江、泸州古隆起为界,在城口—梁平—涪陵一线东南地区沉积了一套以碎屑岩为主的巴东组,西北为碳酸盐岩沉积的雷口坡组 and 天井山组(天井山组也被认为是雷口坡组第五段)。雷口坡组属安尼期,天井山组属拉丁期。受印支运动抬升的影响,地层遭受剥蚀,天井山组只在江油马角坝、绵竹汉旺一带有残留。

1972年,中坝构造上的川19井在 T_2l^3 段获高产气流($0.258 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$),由此发现了中坝雷三碳酸盐岩气藏。产气层位厚100 m左右,属台缘粒屑浅滩相,孔隙度一般为2%~5%。中坝气田是一个小而肥的气田,含气面积不大(13.4 km^2),但丰度高($0.64 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{km}^2$),探明储量 $8.63 \times 10^9 \text{ m}^3$ ^[2]。1980年,磨深2井 T_2l^1 段射孔测试获气 $2.07 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,从而发现了磨溪 T_2l^1

气藏; T_2l^1 亚段为气田主产层,厚约60 m,岩性为针孔藻屑白云岩,探明储量 $25.387 \times 10^9 \text{ m}^3$ ^[2]。

中坝和磨溪气田的发现在当时均掀起了寻找雷口坡组储层的热潮。不过遗憾的是,多年来四川盆地除了这两个大中型气田之外,再也没能获得大的突破。然而,在近年的油气勘探中,雷口坡组油气显示活跃,因而得到越来越大的关注。本文通过对四川盆地中西部(川中、川西矿区所属辖区)雷口坡组的油气地质条件分析,认为雷口坡组应是四川盆地中西部油气勘探的新方向。

1 沉积-构造特征

近年来,笔者在四川盆地观察了多条雷口坡组野外剖面,研究了钻井岩心、岩屑薄片近2 000片,对四川盆地中西部雷口坡组的沉积相和构造背景有了新的认识。

制约四川盆地雷口坡组沉积最直接的因素是龙门山岛链、康滇古陆、江南古陆的存在。四川盆

[收稿日期] 2009-07-10

[作者简介] 汪华(1975—),女,博士,研究方向:石油地质学, E-mail:21153902@qq.com。

地在早三叠世飞仙关期,地势西高东低,从西向东相变明显,为河流相—潮坪相—浅海相渐变,碎屑岩逐渐减少,碳酸盐岩逐渐增加^[3]。到了中三叠世,康滇古陆进入夷平阶段,江南古陆剧烈上升并向川东、鄂西提供了丰富的陆源碎屑,地势反转,变为东高西低^[4]。

四川盆地雷口坡组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。海水主要从西南康滇古陆与越北古陆之间的开远海峡进入上扬子海盆,再越过黔南堤礁从川西南一带侵入四川海盆;次要海侵方向经由阿坝海域穿越龙门山岛链之间的通道或漫过水下的海堤进入四川海盆^[5]。

四川盆地中西部雷一、雷二为海退期^[6],为开阔台地相和局限台地相沉积,川西地区发育台地边缘浅滩亚相,川中地区以潟湖亚相、咸化潟湖亚相和台内滩亚相为主(图 1)。雷二后期开始海侵,雷三为最大海侵时期,海平面上升到最高后,海水开始退出。雷三期川西、川中均为开阔台地相,大部分地区为潮下亚相;西部发育面积范围较大的台地边缘浅滩亚相。雷四仍处于海退期,沉积相以局限台地为主,天气干旱,盐度高,为咸化潟湖亚相;在西部仍有台地边缘浅滩相。天井山

期有一次小规模的海侵。雷口坡组岩性为白云岩、石灰岩、石膏及泥页岩的组合,向东至万州逐渐夹较多的紫红色泥岩和泥灰岩,从而向巴东组过渡。天井山组以生物屑、砂屑灰岩及亮晶鲕粒灰岩为主,被称为天井山灰岩,属开阔台地相产物;但因后期地层抬升剥蚀强烈,仅在川西有零星残留。

从古生代到晚三叠世早期,四川盆地西部及龙门山地区处于拉张环境^[7],川西地区在雷口坡期为拉张构造背景。通过对过龙深 1 井的川西 L2 地震测线的解释分析,可以看到明显的张性断裂(图 2)。到了晚三叠世须家河期,构造反转,结束了龙门山和四川盆地西部地区的被动大陆边缘性质,使构造运动由早期的张性转化为压性。

2 油气地质条件分析

2.1 烃源岩条件

对于雷口坡组的天然气来源,早年多认为是雷口坡组生物灰岩和泥岩生成的油气^[4,5,8];但随着碳酸盐岩成藏理论的研究,人们开始认识到碳酸盐岩所生油气难以形成工业性气藏。中国学者在碳酸盐岩的生油下限问题上一直有争论。彭平安^[9]认为海相碳酸盐岩烃源岩的最低、有效油源

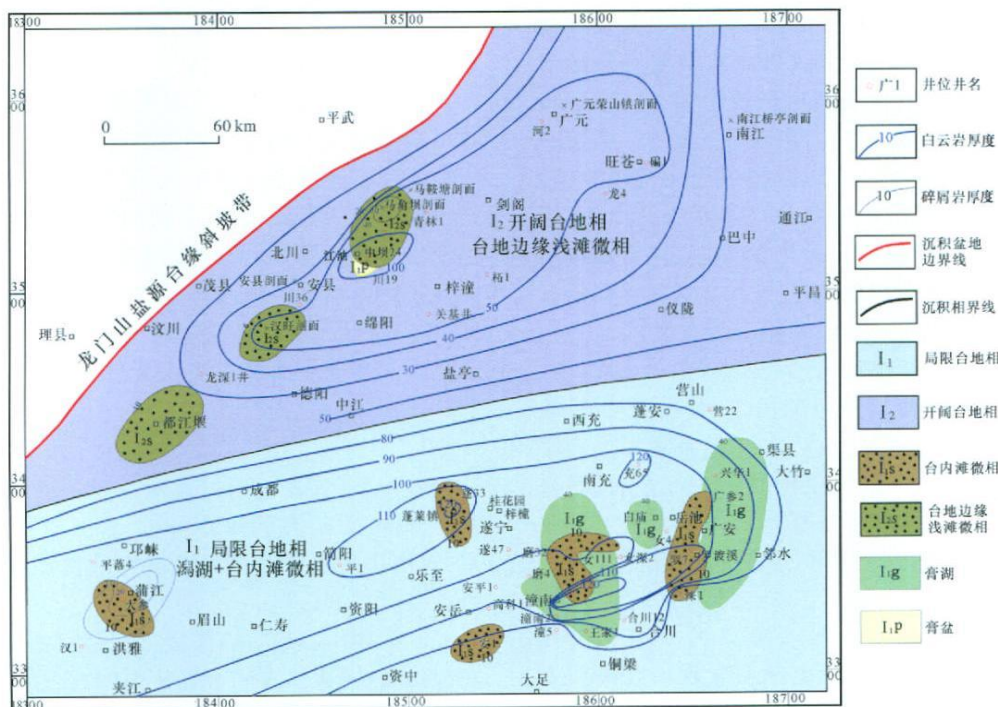


图 1 四川盆地中西部雷口坡组第一段沉积相图

Fig. 1 The sedimentary facies graph of Member 1 of Leikoupo Formation in the middle-west part of Sichuan Basin

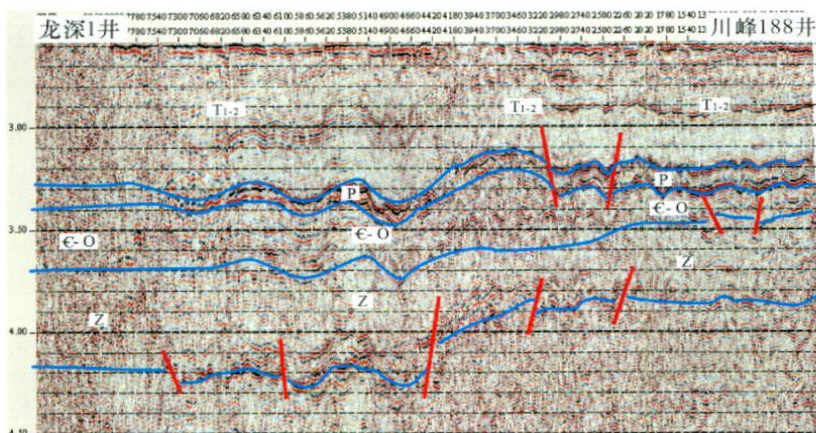


图2 川西 L₂ 线拉平雷口坡组顶面地震剖面解释图

Fig.2 The interpretation of L₂ profile flattening the top of the Leikoupo Formation in the west part of Sichuan Basin

岩的有机碳质量分数的下限值可能在 0.1% 和 0.4% 左右,最低、有效气源岩的有机碳质量分数的下限可能在 0.1% 和 0.3% 左右,大规模油气田形成的有机碳质量分数的应在 1% 以上。这里所指的有效源岩是指所生气可以形成油气藏的烃源岩。四川盆地雷口坡组有机碳质量分数的平均值约为 0.15%^[6],虽具有一定的生油能力,但丰度较低,不具备成藏能力,不能成为有效气源岩。

磨溪雷口坡组气藏的天然气,甲烷含量高(质量分数 > 90%),重烃含量很低,干燥系数大(大于 69%),很少或没有凝析油,为典型干气;而其本身生油岩成熟度 R_o 值为 1.3%~1.8%,处于高熟油-湿气阶段,远未达到干气阶段。王顺玉^[10]根据天然气的组成、碳同位素和储层沥青的生物标志化合物分布的综合研究,认为磨溪气田 T_2l^1 气藏的天然气主要来源于上二叠统龙潭组的煤系烃源岩。

中坝构造的雷三除天然气之外,还产凝析油。雷三的凝析油含有异常高的苯、甲苯,与煤成烃形成的凝析油特征相符。王廷栋^[11]利用中坝雷三气藏的天然气 $\delta^{13}C_3$ - $\delta^{13}C_2$ 值所估算的天然气成熟度与须一接近,认为其天然气应主要来自于须一段,即小塘子组。王世谦^[12]在对中坝雷口坡组气藏气体组分的研究中发现,中坝雷三的天然气属油型裂解气,除部分来源于上三叠统马鞍塘组、小塘子组煤成气以外,也有部分来源于下部中三叠统一震旦系深层油裂解气。

因此,雷口坡组气藏应为外源天然气供给为主。四川盆地除中坝气藏以外的雷口坡组天然气主要来自于龙潭组的煤成气,这一观点为大多数

学者所认同^[10,13];而中坝气藏由于其特殊的构造形态,彰明断层使其下盘的须家河组烃源岩和上盘的雷口坡组储层雷三段对接,使须家河组的煤成气得以“倒贯”进入储层^[11]。

2.2 储集条件

磨溪 T_2l^1 和中坝 T_2l^3 储层主要为一套碳酸盐岩台地相沉积的藻砂屑、砂屑滩相白云岩储层,野外常称为针孔状白云岩,其针孔多数是藻屑间硬石膏胶结物受溶蚀作用造成,作为储集的孔隙类型主要为残余原生孔隙和溶蚀孔洞。雷口坡组沉积时,气候较干旱、蒸发强、盐度不正常,故出现大量的白云岩、石膏和硬石膏沉积,即使在水动力较强、沉积砂屑与藻砂屑的地方,盐度也较高,使粒屑间也多为硬石膏胶结。这为后期溶蚀作用产生次生孔隙,形成优质储层提供了有利条件。总而言之,各类浅滩环境是雷口坡组储层发育的基础,淡水溶蚀作用有效改善了储层的储渗性。

近年来,人们开始重视在雷口坡组顶部寻找古喀斯特储层。雷口坡组沉积后,受印支运动影响,四川盆地整体抬升,遭受剥蚀,大部分地区保存不全,泸州、江津一带雷口坡组已全部被剥蚀,其外围仅有 T_2l^1 和 T_2l^2 段存在,江油马角坝、绵竹汉旺一带残留有 T_2l^5 段,其他地区保留有 T_2l^3 和 T_2l^4 层段^[14]。对川西、川中雷口坡组雷顶 (T_2l^3 和 T_2l^4) 的岩心观察和薄片鉴定,可以确定研究区在表生成岩期有喀斯特作用,主要表现为喀斯特角砾岩、去膏化、去白云石化、硅化和溶孔、溶缝的形成,还可见渗流带的产物——渗流砂、渗流豆石(图 3-A, B)。在各种地球化学标志中, $^{87}Sr/^{86}Sr$, $\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$, Sr 含量是确定是否有大气

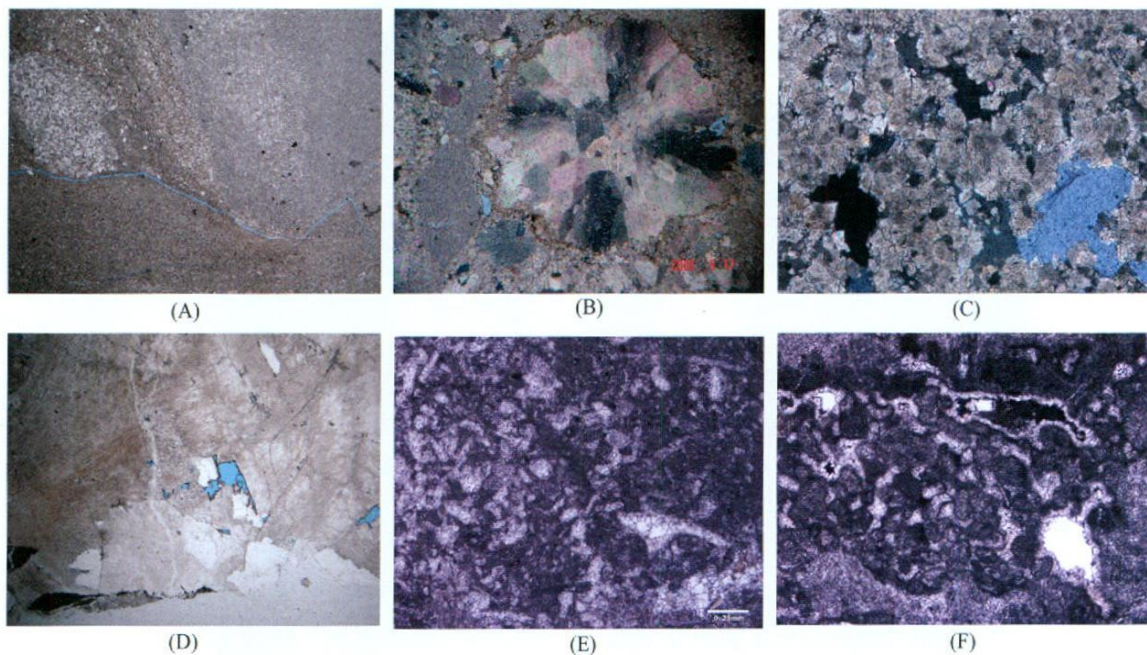


图 3 四川盆地中西部雷口坡组显微镜照片

Fig. 3 The plate of Leikoupo Formation's microscopic style in the middle-west part of Sichuan Basin

(A) 磨 16 井, 深度 2 371.28 m, T_2l^1 喀斯特角砾岩: 角砾间粉砂、泥、泥晶白云石充填+喀斯特缝, -N, $\times 4$; (B) 营 21 井, 深度 2 657.80 m, T_2l^1 微晶砂屑白云岩: 渗流豆石, -N, $\times 10$; (C) 青林 1 井, 深度 3 805.24 m, T_2l^3 细晶残余砂屑白云岩: 萤石(2 粒)+天青石(1 粒), +N, $\times 10$; (D) 磨 22 井, 深度 2 320.30 m, T_2l^3 粗-泥晶含灰云岩: 马鞍状白云石+晶内溶孔, -N, $\times 2$; (E) 龙深 1 井, 深度 6 302.09 m, T_2l^3 泥晶海绵屑白云岩: 海绵及其骨针, -N, $\times 4$; (F) 中 46 井, 深度 3 087.04 m, T_2l^3 团块砂屑白云岩: 疑似海绵屑+溶孔+渗流砂, -N, $\times 4$

淡水参与最为灵敏的地球化学指标。笔者对川中地区 11 口井的 48 件碳酸盐岩样品的这四项地球化学指标进行了组分分析, 发现雷四段和雷三段曾经遭受过大气淡水淋滤作用。因此, 在雷口坡组顶部, 具备发育古喀斯特储层的良好条件。

川中、川西多口井的薄片研究中, 在 T_2l^1 至 T_2l^4 层段发现了萤石、天青石和马鞍状白云石等热液作用矿物及其矿物组合, 并见强硅化, 为热液活动的结果(图 3-C, D), 表明四川盆地在中三叠统沉积期间或之后遭受了来自雷口坡组之外热流体的作用。因此, 四川盆地雷口坡组的白云石化很可能与构造热液活动有关。根据 Graham R. Davies 等^[15]的观点, 热液白云石化一般存在于拉伸环境。张性构造环境所造成的张性断层, 有利于热液流体的活动和热液白云石化作用的产生; 马鞍状白云石是热液背景的重要指示物。

除了藻砂屑、砂屑滩相白云岩储层、古喀斯特储层和构造热液白云岩储层外, 笔者在近期的工作中, 发现在雷口坡组还有可能存在礁滩组合形成的储层。薄片观察时, 在龙深 1 井深度为 5 982 m (T_2l^1) 和 6 315 m (T_2l^3) 附近发现了钙质海绵

(图 3-E), 在中 46 井深度为 3 061.20 m (T_2l^3) 和 3 082.13 m (T_2l^3) 附近也发现了钙质海绵, 在中 46 井 T_2l^3 多个深度段上也有海绵屑存在(图 3-F)。这是首次在四川盆地雷口坡组发现钙质海绵。钙质海绵是重要的造礁生物, 这在四川盆地中西部雷口坡组寻找礁滩组合优质储层提供了线索。

2.3 盖层条件

雷口坡组自身的膏岩层是雷口坡组气藏最好的直接盖层。笔者对龙深 1 井雷口坡组的石膏层厚度做了统计, 该井雷口坡组石膏层总厚 205.6 m, 其中雷一段 35 m, 雷二段 54.3 m, 雷三段 32.8 m, 雷四段 83.5 m, 封隔性能好。而上三叠统马鞍塘组和须家河组的泥质岩是雷口坡组最好的区域盖层。因此, 雷口坡组盖层条件非常好。

3 四川盆地中西部中三叠统天然气勘探新方向

四川盆地多年的油气勘探历程揭示出, 在烃源丰富、盖层良好的条件下, 储集条件最为重要, 发现新的储层类型或层位, 就可能发现一批新的

油气藏。因此,本文着重分析雷口坡组的储层新类型,并认为雷口坡组是四川盆地中西部天然气的勘探新方向。

3.1 喀斯特储层

对于中坝的雷口坡组储层,过去都认为与滩相白云岩有关^[6,8]。通过对川西中46井、青林1井雷三取心段近600片薄片的详细观察,发现 T_2l^3 段岩性主要为藻砂屑白云岩,有发育的原生粒间孔和次生的溶孔、溶缝(与古喀斯特有关)。其古喀斯特标志有喀斯特角砾岩、去膏化、去白云石化及潜流带的淡水粒状亮晶白云石胶结物,也有渗流带的渗流砂、渗流粉砂及显现的层理构造,当然更有大量的粒间、粒内溶孔,故知川西中坝 T_2l^3 段储层,既与滩相白云岩有关,也与雷顶的古喀斯特作用有关。

近年来,川中北部地区雷口坡组2口井试油有工业气流,而且是雷顶古风化壳 T_2l^1 段显示,储层岩性是白云岩、喀斯特角砾状白云岩和纹层状藻白云岩;储集空间以溶孔为主,包括粒内溶孔和粒间溶孔,也有晶间孔和晶间溶孔,显然与雷顶的古喀斯特作用有关。

因此,在四川盆地中西部应注意寻找雷口坡组古喀斯特气藏。古喀斯特储层最为发育的地区应是中三叠世末遭受剥蚀多、时间长的地区,如川中隆起及其斜坡地区。

3.2 礁滩储层

钙质海绵礁滩组合是川东北长兴组和飞仙关组优质储层发育部位^[16]。龙深1井雷三、雷四段和中46井雷三段都为滩相沉积,岩心薄片观察中又发现了钙质海绵,龙深1井礁滩组合总厚12.08 m。雷四段以台内滩夹生物礁为主,滩相累计厚度1.99 m,礁相累计厚度1.62 m;雷三段以海侵的台缘滩夹生物礁为主,滩相累计厚度6.9 m,礁相累计厚度1.57 m。雷口坡组钙质海绵和礁滩组合的确定,展示了川西地区雷口坡组可能发育礁滩组合形成的优质储层,值得关注。特别值得关注的地区是龙门山前缘(川西)地区,因为该地区中三叠世时,拉张活动较强,致使沉积分异较大,更有利于形成礁滩组合,尤其是川西台地边缘滩裙的广元—江油—蒲江一带。

3.3 热液白云岩储层

热液白云石化作用形成的白云岩通常沿拉张断层和走滑断层发育,或发育在这些断层的周围。世界上最大油田(Ghawar, Saudi Arabia)及最大

气田(North field, Arabian Gulf),现已识别出构造控制的热液白云岩储层(HTD),其可能也是四川盆地海相碳酸盐岩优质储层形成的主要机制之一^[17,18]。四川盆地Z— T_2 张性构造背景的确定和中三叠统热液矿物的普遍存在,尤其是马鞍状白云石的发现,揭示出四川盆地雷口坡组可能存在由热液白云岩构成的优质储层。特别值得关注的地区是龙门山前缘(川西)地区。

4 结论与建议

a. 四川盆地中西部雷口坡组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,主要亚相为泻湖和潮坪。其沉积时该区地壳处于拉张状态。

b. 雷口坡组有良好的烃源岩条件,多种类型的优质储层,有膏岩层、泥岩层的良好封隔,具有形成大中型气藏的地质条件。近年钻井过程中,雷口坡组油气显示活跃,展示了良好的勘探前景,应是四川盆地中西部油气勘探的新方向。

c. 寻找古喀斯特储层、礁滩储层和热液白云岩储层气藏是四川盆地中西部雷口坡组的勘探新方向。古喀斯特气藏的有利勘探区应是川中隆起及其斜坡地带,层位为雷顶,即雷三、雷四段。礁滩储层和热液白云岩储层气藏的重点勘探地区应是龙门山前缘(川西)地区,尤其是川西台地边缘滩裙的广元—江油—蒲江一带。

d. 雷口坡组源储距离较大,必须要有断穿龙潭组和下三叠统的断层裂缝系统作为运移通道;所以在预测有利勘探区时,应重视天然气输导体系的研究。

[参 考 文 献]

- [1] 刘树根,汪华,孙玮,等.四川盆地海相领域油气地质条件专属性问题分析[J].石油与天然气地质,2008,29(6):781—792.
- [2] 沈安江,周进高,辛勇光,等.四川盆地雷口坡组白云岩储层类型及成因[J].海相油气地质,2008,13(4):19—28.
- [3] 曾德铭.川西北地区中三叠统雷口坡组储层研究[D].成都:西南石油大学,2005:15—16.
- [4] 李志高.川西雷口坡组找油气前景[J].天然气工业,1993,13(2):28—33.
- [5] 何鲤,廖光伦,戚斌,等.中坝气田雷三气藏分析及有利相带预测[J].天然气勘探与开发,2002,25(4):19—26.
- [6] 崔德树,田端孝,傅恒正,等.四川盆地中三叠统雷口

- 坡组岩相及其与油气关系探讨[C]//石油地质文集:第7集.北京:地质出版社,1983,9-20.
- [7] 刘树根,庞家黎,童崇光,等.川西晚三叠世前陆盆地的形成与演化[J].天然气工业,1995,15(2):11-15.
- [8] 李书兵,罗啸泉,陈洪德,等.川西龙门山造山带雷口坡组天然气勘探前景[C]//第二届中国石油地质年会论文集.北京:石油工业出版社,2006,189-197.
- [9] 彭平安,刘大永,秦艳,等.海相碳酸盐岩烃源岩评价的有机碳下限问题[J].地球化学,2008,37(4):415-422.
- [10] 王顺玉,戴鸿鸣,王廷栋,等.磨溪气田高成熟天然气的气源与运移[J].勘探家,1998,3(2):5-8.
- [11] 王廷栋,王海清,李绍基,等.以凝析油轻烃和天然气碳同位素特征判断气源[J].西南石油学院学报,1989,11(3):1-15.
- [12] 王世谦.四川盆地侏罗系一震旦系天然气的地球化学特征[J].天然气工业,1994,14(6):1-5.
- [13] 戴鸿鸣,黄清德,王海清,等.天然气横向运移研究——以四川盆地磨溪气田为例[J].天然气地球科学,1998,9(2):7-11.
- [14] 胡光灿,谢姚祥.中国四川东部高陡构造石炭系气田[M].北京:石油工业出版社,1997,13.
- [15] DAVIES G R, SMITH Jr L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11):1641-1690.
- [16] 王兴志,张帆,马青,等.四川盆地东部晚二叠世一早三叠世飞仙关期礁、滩特征与海平面变化[J].沉积学报,2002,20(2):249-254.
- [17] 刘树根,黄文明,陈翠华,等.四川盆地震旦系一古生界热液作用及其成藏成矿效应初探[J].矿物岩石,2008,28(3):41-50.
- [18] 刘树根,黄文明,张长俊,等.四川盆地白云岩成因的研究现状及存在问题[J].岩性油气藏,2008,20(2):6-15.

Study on petroleum geological conditions and hydrocarbon exploration direction of Leikoupo Formation in the centre and west of Sichuan Basin, China

WANG Hua^{1,2}, LIU Shu-gen¹, QIN Chuan¹, ZHANG Chang-jun¹,
WANG Guo-zhi¹, LI De-xing¹, DAI Han-song¹

1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation,
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. The Southwest Oil and Gas Field Co., CNPC, Chengdu 610051, China

Abstract: So far only two medium-large gas fields, i. e. Zhongba and Moxi gas fields, have been discovered in the Middle Triassic Leikoupo Formation in Sichuan Basin. However, evidences of oil and gas from Leikoupo Formation during recent drillings are common, showing a good petroleum exploration prospect in the formation. Most of Leikoupo Formation is restricted platform facies and a small part of the formation is open platform and evaporated facies in the centre and west of Sichuan Basin. Their main subfacies are lagoons and tidal flats. The crust of this area is in an extensional state during the Leikoupo Formation deposition. The source rocks of Leikoupo Formation are good. There are several types of high quality reservoirs in Leikoupo Formation, such as reef-bank reservoirs, hydrothermal dolostone reservoirs, paleokarst reservoirs, and so on. The gypsum and mudstone are the good covers of Leikoupo Formation. Therefore, Leikoupo Formation has good geological conditions and can form medium-large gas pools. The new exploratory directions of Leikoupo Formation are to look for reef-bank reservoir gas pools, hydrothermal dolostone gas pools and paleokarst reservoir gas pools in the centre and west of Sichuan Basin. The front regions of Longman Mountains (western Sichuan Basin) are the important exploratory areas. However, the distance between the source rocks (Upper Permian Longtan Formation) and reservoir rocks is so far that fault-fracture systems must act as migration pathways (conduit system) for petroleum and gas. The conduit systems must break through the Upper Permian Longtan Formation and Lower Triassic gypsum. Therefore, the study of conduit systems of gas is important in predicting the favorable exploration area in Leikoupo Formation.

Key words: Sichuan Basin; Middle Triassic; Leikoupo Formation; natural gas; petroleum geological conditions; exploration direction