

川西坳陷中三叠统雷口坡组四段气藏气源分析

谢刚平

(中国石化西南油气分公司, 成都 610041)

摘要:川西地区海相层系除发育二叠系等烃源岩之外,中三叠统雷口坡组内部还发育一套潟湖相黑灰色泥微晶白云岩、灰岩烃源岩,其生烃强度为 $(10\sim 40)\times 10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$,具备形成大中型气田的气源条件。通过对川西坳陷不同构造带雷口坡组四段气藏天然气组分、烷烃气碳氢同位素特征、储层沥青、天然气运移条件分析认为,不同构造带具有不同的主力气源。龙门山前构造带PZ1井天然气高含 H_2S 、 $\delta^{13}\text{C}_2$ 偏重 (-26.4‰) 、烷烃气碳同位素呈正序分布、 δD_1 偏轻 (-140‰) ,总体具混源气特征,天然气组分及碳同位素反映的母质演化程度介于二叠系和雷口坡组源岩之间,反映可能为二者的混源气,龙门山前通源断裂的发育为混源成藏提供了条件;新场构造带CK1井天然气微一中含量 H_2S 、 $\delta^{13}\text{C}_2$ 偏轻 (-33.2‰) 、烷烃气碳同位素局部倒转、 δD_1 偏轻 (-147‰) ,具油型气特征,其与雷口坡组烃源岩大致相当,反映主要来源于雷口坡组内部自身的烃源岩。

关键词:烃源岩;天然气;雷口坡组;川西坳陷;四川盆地

中图分类号:TE122.1⁺14

文献标志码:A

Source of gas reservoirs in the fourth member of the Middle Triassic Leikoupo Formation in Western Sichuan Depression

Xie Gangping

(SINOPEC Southwest Oil and Gas Company, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: A set of thick charcoal grey dolomicrite and micrite source rocks developed in the Middle Triassic Leikoupo Formation in the Western Sichuan Depression, in addition to four sets of marine source rocks in the Permian and its underlying strata. The gas generation intensity of the source rocks is about $(1\sim 4)\times 10^9\text{ m}^3/\text{km}^2$, showing a good potential for medium or giant gas fields. According to the gas composition, carbon and hydrogen isotopes, reservoir bitumen and migration conditions, the major sources for the gas reservoirs of the fourth member of the Leikoupo Formation vary in different tectonic zones in the Western Sichuan Depression. The gas from well PZ1 in the Longmenshan piedmont tectonic zone displays high H_2S content, high $\delta^{13}\text{C}_2$ value (-26.4‰) , positive alkane carbon isotopic series and light δD_1 value (-140‰) , consistent with characteristics of mixed gas. The thermal evolution degree reflected by natural gas compositions and carbon isotopes falls between those of Permian and Leikoupo source rocks, which indicates that the gas was sourced from both of them, and the deep faults in front of the Longmenshan Mountains provide favorable conditions for gas migration and accumulation from the source rocks. Meanwhile, the gases from well CK1 in the Xinchang tectonic zone display trace to moderate H_2S content, low $\delta^{13}\text{C}_2$ value (-33.2‰) , partial reversal of alkane carbon isotopic series and a light δD_1 value (-147‰) , consistent with oil-type gas. The thermal evolution degree reflected by natural gas compositions and carbon isotopes is similar to that of Leikoupo source rocks, which indicates that the gases were mainly from the interior source rocks of the Leikoupo Formation.

Key words: source rock; natural gas; Leikoupo Formation; Western Sichuan Depression; Sichuan Basin

近年来,川西坳陷中三叠统雷口坡组(T_2l)天然气勘探取得重大突破,一批重点探井先后在雷口坡组四段钻获高产工业性气流,展示了其良好的勘探前景^[1-5]。然而,这些天然气来源于哪些烃源层系,雷口坡组是否存在有效烃源岩,是否能形成天

然气规模聚集,下伏二叠系烃源岩形成的天然气能否穿越中下三叠统膏盐岩层运移至雷口坡组成藏等问题均困扰着勘探决策。本文针对上述问题,通过对川西坳陷有代表性的两大构造带(龙门山前构造带、新场构造带)雷口坡组四段天然气组

分、烷烃碳氢同位素特征、储层沥青、天然气运移条件等进行综合分析,探讨雷口坡组四段气藏在不同构造带的气源,以期为区带评价及下一步勘探部署提供参考依据。

1 烃源岩特征及分布

前人研究表明,川西地区二叠系及以下海相层系发育4套烃源岩,分布较广,厚度较大,品质较好。各套烃源岩从中三叠世末相继达到生烃高峰,具有幕式供烃的特征,天然气总资源量为 $20\ 004 \times 10^8\ \text{m}^3$,资源潜力巨大^[6]。

另外,川西地区雷口坡组内部发育一套潟湖相黑灰色泥微晶白云岩、灰岩烃源岩,为雷口坡组天然气成藏提供了近源物质基础^[7]。近期进一步研究表明,雷口坡组烃源岩形成于生物生产力较高、水动力较弱、海水循环受限、盐度较高、底部水体缺氧和沉积速率较低的沉积环境,这样的沉积环境有利于有机质的保存。雷口坡组碳酸盐岩烃源岩残余有机碳分布在 $0.2\% \sim 0.89\%$,已达到高一过成熟碳酸盐岩有效烃源岩的评价标准 ($\geq 0.2\%$)^[8],转化率平均达 24.7% ,具有转化率较高的特点。该套烃源岩有机质的生物来源主要是水生浮游生物,烃源岩中常见具生物体结构的薄膜状、片状或块状炭化生屑,有机质类型指数 (*TI*) 为 $33.12\% \sim 72.75\%$,反映该套烃源岩有机质类型属于 $\text{II}_1 - \text{II}_2$ 型。该套烃源岩须三沉积末期进入生烃门限,须五沉积末期进入成熟演化阶段,早侏罗世末达到高成熟演化阶段,晚侏罗世末到现今达到过成熟演化阶段。雷口坡组烃源岩在彭州—绵竹及洛带—回龙地区发育最好,烃源岩厚度分别为大于 $300\ \text{m}$ 和 $250 \sim 300\ \text{m}$,有机碳含量从 0.3% 到 0.9% ,有机质类型属于 II 型, R_o 分别为 $2.8\% \sim 3.6\%$ 和 $2.2\% \sim 3.0\%$,生烃强度分别为 $(20 \sim 45) \times 10^8\ \text{m}^3/\text{km}^2$ 和 $(20 \sim 28) \times 10^8\ \text{m}^3/\text{km}^2$ (图1)。其次分布在大邑—新都—德阳—绵阳地区,烃源岩厚度 $200 \sim 300\ \text{m}$,

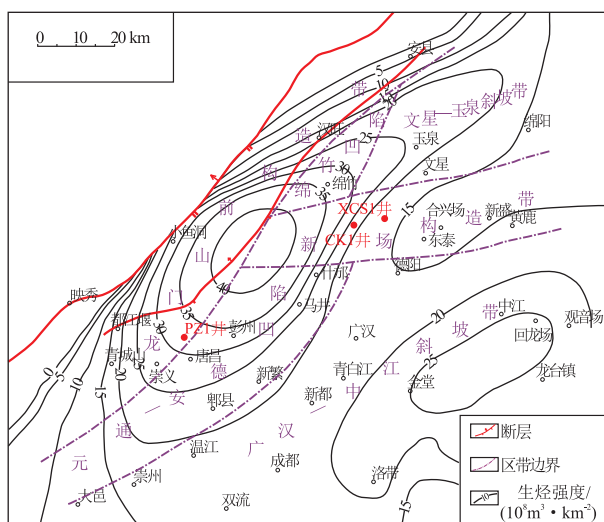


图1 川西坳陷雷口坡组烃源岩生烃强度分布

Fig.1 Hydrocarbon generation intensity of source rocks in Leikoupo Formation, West Sichuan Depression

有机碳含量为 0.3% 左右,有机质类型属于 II 型, R_o 为 $2.2\% \sim 3.4\%$,生烃强度为 $(10 \sim 20) \times 10^8\ \text{m}^3/\text{km}^2$ 。初步估算雷口坡组烃源岩形成的可供聚集天然气资源量为 $11\ 260.9 \times 10^8\ \text{m}^3$,为雷口坡组气藏的近源烃源岩。

2 雷口坡组四段气藏气源分析

2.1 天然气组分

从天然气组分特征来看(表1),川西坳陷雷口坡组四段气藏在纵横上天然气组分均存在明显差异。

纵向上,同采自于川西坳陷新场构造带 CK1 井的天然气分为2类(表1):第一类天然气 CH_4 、 C_2H_6 、 CO_2 、 N_2 平均含量分别为 94.38% 、 0.35% 、 4.58% 、 0.38% , H_2S 含量 $0.000\ 6\% \sim 0.72\%$,平均含量 0.25% ,干燥系数 $0.996\ 2$,属高甲烷、低重烃、中 CO_2 、中 H_2S 的干气,此类天然气样品采自 CK1 雷四上亚段顶部 $5\ 623 \sim 5\ 635\ \text{m}$ 产层段。第二类天然气甲烷含量 97.98% ,乙烷含量 0.28% ,

表1 川西坳陷雷口坡组四段天然气地球化学特征

Table 1 Geochemical characteristics of natural gas from fourth member of Leikoupo Formation in Western Sichuan Depression

构造带	井号	深度/m	距不整合面/m	各组分含量/%										干燥系数	碳同位素/‰			氢同位素/‰	
				CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	CO_2	N_2	O_2	H_2	H_2S	CH_4		C_2H_6	C_3H_8	CH_4	C_2H_6	
新场	CK1	5 623 ~ 5 635	1.5	94.47	0.36	0.02	0.00	4.46	0.39	0.02	0.00	0.260 00	0.996 0						
				93.94	0.36	0.02	0.00	4.47	0.43	0.03	0.00	0.720 00	0.995 9						
				94.53	0.36	0.02	0.00	4.62	0.41	0.03	0.00	0.000 60	0.996 0						
				94.57	0.33	0.00	0.00	4.78	0.30	0.00	0.00	0.020 00	0.997 0	-33.2	-34.8	-32.6	-147	-131	
				97.98	0.28	0.01	0.00	0.00	1.64	0.00	0.00	0.000 03	0.997 0						
龙门山前	PZ1	5 814 ~ 5 866	59	94.12	0.13	0.00	0.00	1.20	0.85	0.00	0.02	3.500 00	0.998 6	-31.6	-26.4	-22.8	-140	-97	

硫化氢含量 0.000 03%，干燥系数 0.997 0，属高甲烷、低重烃、微含 H₂S 的干气，此类天然气样品来自雷口坡组四段上亚段下部 5 680 ~ 5 686 m 含气段。总体上，雷四上亚段顶部天然气比中部的天然气甲烷含量低、硫化氢含量高，说明它们的成因存在一定差异。这可能与雷口坡组顶不整合面有关，因为不整合面本身即是烃类运移的通道之一，雷四上亚段顶部的天然气在一定程度上可能受到了多源供给；而雷四上亚段中部距雷口坡组顶不整合面相对稍远，推测可能受多源影响较弱所致。

横向上，龙门山前构造带的 PZ1 井雷口坡组四段天然气 CH₄、C₂H₆、CO₂、H₂S、干燥系数含量分别为 94.12%、0.13%、1.2%、3.5%、0.998 6，为高甲烷、高含 H₂S 的干气(表 1)。与 CK1 井雷四段天然气相比，PZ1 井天然气烃类组分与 CK1 井雷四上亚段顶部天然气相似，说明 PZ1 井也属混源气，但 PZ1 井过高的硫化氢含量又与之有明显区别，说明它们的成因也存在一定的差异。

2.2 烷烃气碳氢同位素特征

乙烷碳同位素($\delta^{13}C_2$)具有较强的原始母质继承性，尽管也受源岩热演化程度的影响，但受影响程度远小于甲烷碳同位素($\delta^{13}C_1$)，因此， $\delta^{13}C_2$ 是区别煤成气和油型气的最常用的有效指标^[9]。综合前人的判别标准^[9-11]，本文将 $\delta^{13}C_2 = -28\text{‰}$ 作为判别煤型气和油型气的界线， $\delta^{13}C_2 > -28\text{‰}$ 的天然气为煤型气， $\delta^{13}C_2 < -28\text{‰}$ 的天然气为油型气。

位于新场构造带的 CK1 井 $\delta^{13}C_1 = -33.2\text{‰}$ ， $\delta^{13}C_2 = -34.8\text{‰}$ ，都偏轻，有别于陆相须家河组和侏罗系天然气，表现出典型的油型气特征(图 2)，应来自于海相有机质的贡献。同时，从天然气烷烃气碳同位素类型曲线可以看出(图 3)，CK1 井雷四上

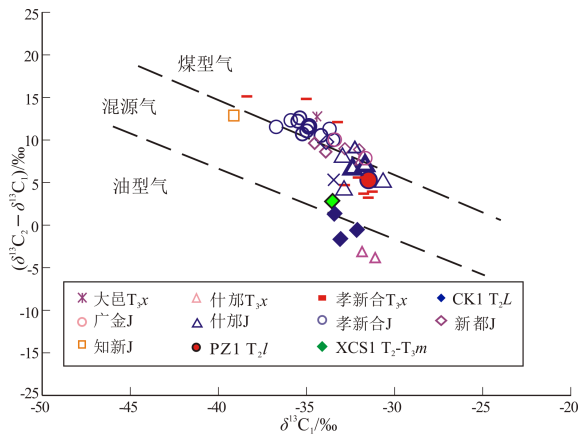


图 2 川西坳陷不同层系天然气碳同位素特征

Fig. 2 Carbon isotopic characteristics of gases from different strata in Western Sichuan Depression

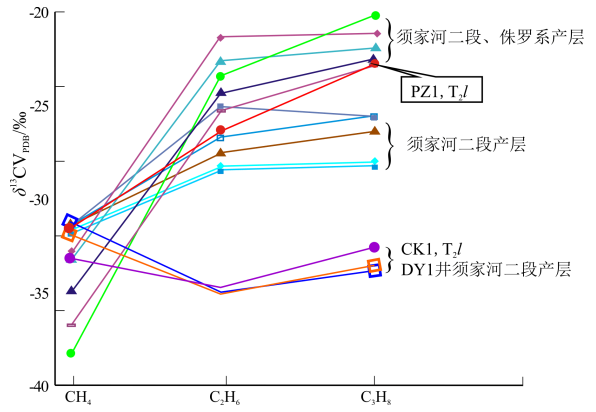


图 3 川西坳陷不同层系天然气烷烃碳同位素序列

Fig. 3 Alkane carbon isotopic series of gases from different strata in Western Sichuan Depression

亚段顶部产气段天然气烷烃碳同位素序列表现为倒转，与本区陆相上三叠统须家河组天然气正常序列特征差异明显，说明 CK1 井雷四上亚段天然气并非上三叠统陆相烃源岩“倒灌”成藏，而是来自于下部海相气源。

位于龙门山前构造带的 PZ1 井 $\delta^{13}C_1 = -31.6\text{‰}$ ， $\delta^{13}C_2 = -26.4\text{‰}$ ，明显比新场构造带的 CK1 井偏重，尤其以 $\delta^{13}C_2$ 值差别明显，表现出偏煤型气的混源气特征(图 2)。同时，烷烃碳同位素构成曲线呈正常序列，但又不同于陆相须家河组及侏罗系天然气碳同位素序列特征。

结合气藏上、下烃源岩特征及油气运移通道分析认为，海陆过渡相烃源岩有机质贡献较大。该区上二叠统龙潭组和上三叠统马鞍塘组二段、小塘子组均发育海陆交互相烃源岩，发育的泥质烃源岩干酪根类型主要为 II - III 型和 III 型。通过计算，PZ1 井天然气组分及甲烷碳同位素反映其母质演化程度(R_0)约为 3.05%，比该区马鞍塘—小塘子组烃源岩成熟度(2.21% ~ 2.19%)高，与该区龙潭组烃源岩成熟度(3.16%)及雷口坡组烃源岩成熟度(2.8% ~ 3.6%)相似，反映其可能为二者的混源气。

有机热成因烷烃气的氢同位素($\delta^{13}D_1$)组成主要受源岩沉积环境和成熟度的影响，由于同一地区源岩成熟度相差不大，因此通常认为，烷烃气的 $\delta^{13}D_1$ 首先受制于沉积环境，随着沉积介质盐度增大，烷烃气 $\delta^{13}D_1$ 组成变重；其次受成熟度影响，随着热演化程度增高，烷烃气 $\delta^{13}D_1$ 也随之变重^[10-15]。CK1 井、PZ1 井甲烷氢同位素值相近，分别为 -147‰ 和 -140‰ ，而乙烷氢同位素值差别大，分别为 -131‰ 和 -97‰ ，在 $\delta^{13}C_2 - \delta^{13}D_1$ 关系图上(图 4)，CK1 井表征为海相气源，而 PZ1 井介于

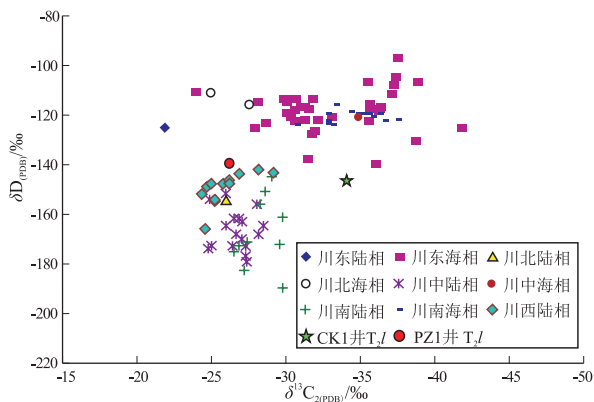


图4 川西坳陷不同层系天然气 $\delta^{13}C_2$ - $\delta^{13}D_1$ 关系

Fig. 4 $\delta^{13}C_2$ vs. $\delta^{13}D_1$ of gases from different strata in Western Sichuan Depression

海相与陆相之间,也表现为混源气,但略微更靠近陆源烃源岩。

2.3 储层沥青

天然气气藏储集层沥青是天然气藏中的储集层抽提物,一方面当烃以油相运移进入储集层后再进一步因热成熟作用成气,在成气过程中储集层仍残留了一些可溶的重组分;另一方面以气相运移的

烃进入储集层以后,一些重组分由于反凝析、吸附等因素而保留在储层中,这些重组分的烃与天然气同时生成,因而可以利用储集层抽提物的生物标志化合物作为桥梁进行气源对比^[16]。

XCS1 井雷四上亚段顶部储层沥青与上覆上三叠统马鞍塘组二段及小塘子组泥质烃源岩生物标志化合物组合对比表明,反映母质类型的规则甾烷差异明显,储层沥青 $\alpha\alpha\alpha C_{27}$ 、 C_{28} 、 C_{29} 规则甾烷呈近对称的“V”字型,而上述2个层系烃源岩的规则甾烷呈不对称的“V”字型(图5)。说明,XCS1 井雷四上亚段储层沥青并非来自马二段和小塘子组泥质烃源岩,而与 XCS1 井雷三段深灰色白云质灰岩烃源岩相比,则具有相似的生物标志化合物组合特征(图5)。表现在:①孕甾烷与升孕甾烷、重排甾烷含量低,规则甾烷含量相对较高;② $\alpha\alpha\alpha C_{27}$ 、 C_{28} 、 C_{29} 规则甾烷呈近对称的“V”字型;③长链三环萜含量低,五环三环萜含量高,全系列构成曲线相似;④ γ -蜡烷含量丰富,反映了该井雷四段储层沥青应主要来自于雷三段烃源岩。同时,规则甾烷特征又略有差别,说明可能由于储层沥青样靠近不整合

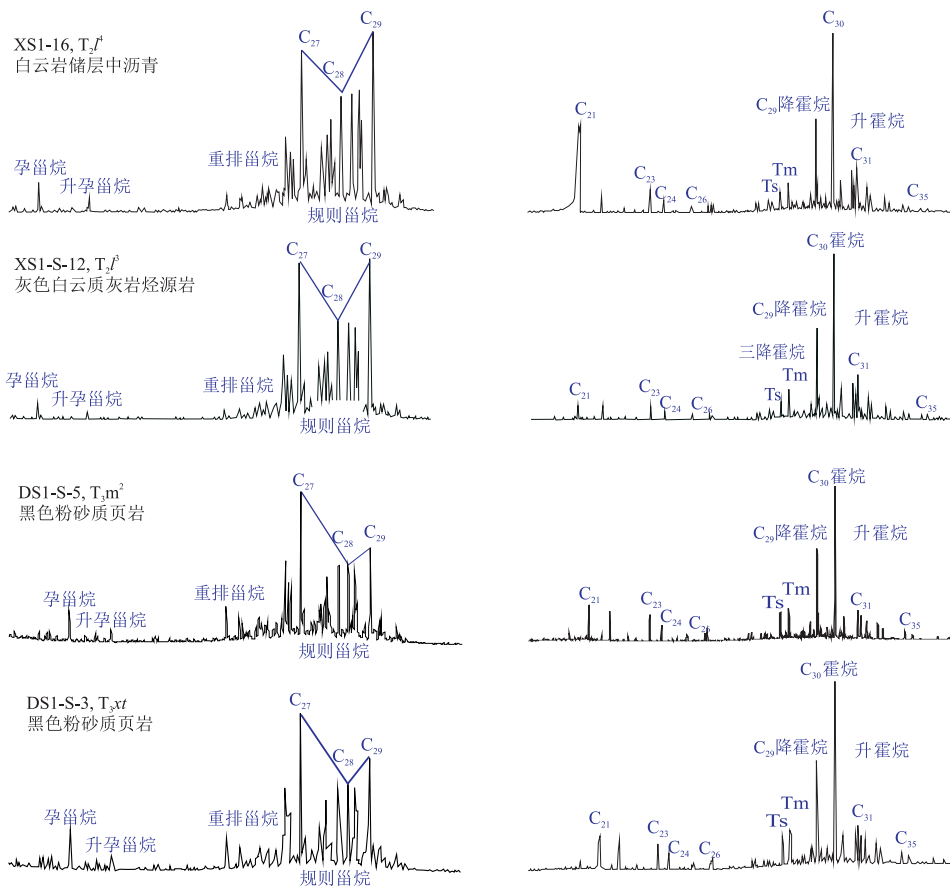


图5 川西坳陷雷口坡组四段储层沥青与烃源岩饱和烃图谱对比

Fig. 5 Saturated hydrocarbon atlas between reservoir bitumen and source rocks from fourth member of Leikoupo Formation in Western Sichuan Depression

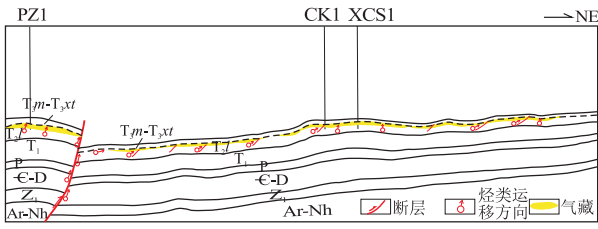


图 6 川西坳陷雷口坡组四段天然气成藏模式

Fig. 6 Hydrocarbon accumulation model of fourth member of Leikoupo Formation in Western Sichuan Depression

面,有少量其他层位气源混入所致。

2.4 天然气运移

对于龙门山前构造带,由于印支晚期—喜马拉雅期曾经历了多期次的强烈挤压抬升,形成了北东向多组断裂(图 6),它们为油气的垂向运移提供了有利的条件,所以 PZ1 井表现出混源特征。

对于处于川西坳陷中央的新场构造带而言,古生界烃源岩埋深大,距现今三叠系主要勘探目的层系雷口坡组距离远,缺乏能沟通下伏二叠系及以下海相层系烃源岩层的区域大断裂;且中下三叠统发育多套膏盐岩层,阻碍了下伏烃类向上运移,因此,川西坳陷内只能靠近源烃源岩贡献。通过三维地震资料解释表明,雷口坡组内部及雷口坡组顶不整合面上面层间小断裂发育;裂缝预测也表明,雷口坡组顶部发育北东向及北西向两组裂缝,平面上呈网状,它们与不整合面一起共同为雷口坡组气藏构成了近源烃源岩运移输导体系。实钻 CK1 井、XCS1 井均获得高产,且 CK1 井自投产以来,日产气量稳定在 $10.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 左右,油压稳定,累计采气已超过 $1.2 \times 10^8 \text{ m}^3$,说明该区近源气源充足,能够为雷口坡组形成大中型气藏提供物质基础。

3 结论

(1)川西坳陷雷口坡组内部高盐度、强还原潟湖沉积环境发育碳酸盐岩烃源岩,尽管丰度较低(中等级别),但厚度较大,有机质类型属 II 型,演化程度高,生烃强度高,为雷口坡组近源成藏奠定了物质基础。

(2)川西坳陷不同构造带雷口坡组四段存在不同的主力气源,龙门山前构造带为混源气,不整合面、区域大断裂及层间裂缝共同组成了输导体系,具多源优势;川西坳陷新场构造带以雷口坡组内部油型气为主,顶部混有部分其他气源。

参考文献:

[1] 宋晓波,王琼仙,隆轲,等. 川西地区中三叠统雷口坡组古岩

溶储层特征及发育主控因素[J]. 海相油气地质, 2013, 18(2):8-14.

Song Xiaobo, Wang Qiongxian, Long Ke, et al. Characteristics and main controlling factors of middle Triassic Leikoupo Paleokarst reservoirs in western Sichuan Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2013, 18(2):8-14.

[2] 唐宇. 川西地区雷口坡组沉积与其顶部风化壳储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(1):42-47.

Tang Yu. Characterization of the sedimentation of the Leikoupo Formation and the weathering crust reservoirs at the top of the formation in western Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(1):42-47.

[3] 杨克明,朱宏权. 川西叠覆型致密砂岩气区地质特征[J]. 石油实验地质, 2013, 35(1):1-8.

Yang Keming, Zhu Hongquan. Geological characteristics of superposed tight sandstone gas-bearing areas in western Sichuan [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(1):1-8.

[4] 周康,王强,乔永亮. 龙门山造山带与川西前陆盆地的盆山耦合关系对油气成藏的控制作用[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(4):378-383.

Zhou Kang, Wang Qiang, Qiao Yongliang. Control of the basin-range coupling relationship between Longmen Mountain Orogenic Belt and Western Sichuan Foreland Basin to hydrocarbon accumulation [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(4):378-383.

[5] 杨克明. 四川盆地“新场运动”特征及其地质意义[J]. 石油实验地质, 2014, 36(4):391-397.

Yang Keming. Characteristics of Xinchang Movement in Sichuan Basin and its geological significance [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(4):391-397.

[6] 许国明,宋晓波,王琼仙. 川西坳陷中段三叠系雷口坡组—马鞍塘组油气地质条件及有利勘探目标分析[J]. 海相油气地质, 2012, 17(2):14-19.

Xu Guoming, Song Xiaobo, Wang Qiongxian. Analysis of petroleum geologic conditions and favorable prospecting targets of Triassic Leikoupo-Ma'antang formations in the middle segment of Chuankou depression, western Sichuan Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2012, 17(2):14-19.

[7] 许国明,宋晓波,冯霞,等. 川西地区中三叠统雷口坡组天然气勘探潜力[J]. 天然气工业, 2013, 33(8):8-14.

Xu Guoming, Song Xiaobo, Feng Xia. Gas potential of the Middle Triassic Leikoupo Fm in the western Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(8):8-14.

[8] 秦建中. 中国烃源岩[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

Qin Jianzhong. Hydrocarbon source rocks in China [M]. Beijing: Science Press, 2005.

[9] 张士亚, 郜建军, 蒋泰然. 利用甲、乙烷碳同位素判识天然气类型的一种新方法 [M] // 石油与天然气地质文集 (第一集). 北京: 地质出版社, 1988:48-58.

Zhang Shiya, Gao Jianjun, Jiang Tairan. Application of methane and ethane in identification of natural gas types [M] // Oil and gas geology corpus (1). Beijing: Geologic Publishing House, 1988:48-58.

- reservoir and its application [J]. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(1):40-43.
- [22] 张厚福,方朝亮,高先志,等. 石油地质学[M]. 北京:石油工业出版社,2008.
Zhang Houfu, Fang Zhaoliang, Gao Xianzhi, et al. *Petroleum geology* [M]. Beijing, Petroleum Industry Press, 2008.
- [23] 梁狄刚,冉隆辉,戴弹申,等. 四川盆地中北部侏罗系大面积非常规石油勘探潜力的再认识[J]. *石油学报*, 2011, 32(1):8-17.
Liang Digang, Ran Longhui, Dai Danshen, et al. A re-recognition of the prospecting potential of Jurassic large-area and unconventional oils in the central-northern Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(1):8-17.
- [24] 廖群山,胡华,林建平,等. 四川盆地川中侏罗系致密储层石油勘探前景[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(6):815-822, 838.
Liao Qunshan, Hu Hua, Lin Jianping, et al. Petroleum exploration prospect of the Jurassic tight reservoirs in central Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(6):815-822, 838.
- [25] 刘占国,斯春松,寿建峰,等. 四川盆地川中地区中下侏罗统砂岩储层异常致密成因机理[J]. *沉积学报*, 2011, 29(4):744-751.
Liu Zhanguo, Si Chunsong, Shou Jianfeng, et al. Origin mechanism of anomalous tightness of middle and lower Jurassic sandstone reservoirs in Central Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(4):744-751.
- [26] 谢继容,唐大海. 川中公山庙构造沙一段油藏成藏条件[J]. *天然气工业*, 2002, 22(S1):23-26.
Xie Jirong, Tang Dahai. Member Sha-1 oil reservoir formation conditions of Gongshanmiao structure in Central Sichuan [J]. *Natural Gas Industry*, 2002, 22(S1):23-26.
- [27] 谢继容,张健,魏小薇,等. 公山庙沙一段油气藏低孔渗储层产油机理研究[J]. *天然气工业*, 2003, 23(3):34-37.
Xie Jirong, Zhang Jian, Wei Xiaowei, et al. Study of oil producing mechanism for reservoirs with low porosity and permeability [J]. *Natural Gas Industry*, 2003, 23(3):34-37.
- [28] Brown R J, Fatt I. Measurement of fractional wettability of oil-field rocks by the nuclear magnetic relaxation method [C]//Fall Meeting of the Petroleum Branch of AIME. Los Angeles, California, 1956:262-264.
- [29] 徐明,朱传庆,田云涛. 四川盆地钻孔温度测量及现今地热特征[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(4):1052-1060.
Xu Ming, Zhu Chuanqing, Tian Yuntao, et al. Borehole temperature logging and characteristics of subsurface temperature in the Sichuan Basin [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(4):1052-1060.
- [30] 国家发展和改革委员会. SY/T 5153-2007 油藏岩石润湿性测定方法[S]. 北京:石油工业出版社,2007.
National Development and Reform Commission. SY/T 5153-2007 Test method of reservoir rock wettability [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.

(编辑 黄娟)

(上接第422页)

- [10] 王世谦. 四川盆地侏罗系—震旦系天然气的地球化学特征[J]. *天然气工业*, 1994, 14(6):1-5.
Wang Shiqian. Geochemical characteristics of Jurassic-Sinian gas in Sichuan basin [J]. *Natural Gas Industry*, 1994, 14(6):1-5.
- [11] 肖芝华,谢增业,李志生,等. 川中—川南地区须家河组天然气同位素组成特征[J]. *地球化学*, 2008, 37(3):245-250.
Xiao Zhihua, Xie Zengye, Li Zhisheng, et al. Isotopic characteristics of natural gas of Xujiahe Formation in southern and middle of Sichuan Basin [J]. *Geochimica*, 2008, 37(3):245-250.
- [12] 戴金星. 我国有机烷烃气的氢同位素的若干特征[J]. *石油勘探与开发*, 1999, 17(5):27-32.
Dai Jinxing. Characteristics of hydrogen isotopes of paraffinic gas in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1999, 17(5):27-32.
- [13] 戴金星. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别[J]. *天然气地球科学*, 1993, 4(2/3):1-40.
Dai Jinxing. Carbon and hydrogen isotopes in natural gas and their application in gas type identification [J]. *Natural Gas Geoscience*, 1993, 4(2/3):1-40.
- [14] 王晓峰,刘文汇,徐永昌,等. 不同成因天然气的氢同位素组成特征研究进展[J]. *天然气地球科学*, 2006, 17(2):163-169.
Wang Xiaofeng, Liu Wenhui, Xu Yongchang, et al. The hydrogen isotopic composition of natural gases generated from different pathway [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2006, 17(2):163-169.
- [15] 王万春. 天然气、原油、干酪根的氢同位素地球化学特征[J]. *沉积学报*, 1996, 14(增刊):131-135.
Wang Wanchun. Geochemical characteristics of hydrogen isotopic compositions of natural gas, oil and kerogen [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1996, 14(S):131-135.
- [16] 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.
Wang Shunyu, Dai Hongming, Wang Yandong, et al. Gas source and migration of high-mature natural gas in Moxi gas field [J]. *Petroleum Explorationist*, 1998, 3(2):5-8.

(编辑 徐文明)