

四川盆地川东北部飞仙关组高含硫化氢 大型气田群气源探讨

张水昌 朱光有 陈建平 梁英波

(中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心, 北京 100083. E-mail: sczhang@petrochina.com.cn)

摘要 近年来四川盆地川东北地区下三叠统飞仙关组发现了多个高含硫化氢的大型鲕粒岩气藏, 天然气探明储量已超过 $5000 \times 10^8 \text{ m}^3$. 由于该区烃源岩层数多且演化程度高, 受到 TSR 的蚀变改造, 因此气源一直难以确定. 在天然气样品分析的基础上, 综合分析油气地质、烃源岩的分布与演化、成藏充注与调整、以及天然气混合作用与次生蚀变等因素, 认为飞仙关组气藏的主力气源是二叠系龙潭组烃源岩, 其次是志留系龙马溪组烃源岩. 由于圈闭形态与不同烃源岩生排烃时期的匹配差异, 造成各气藏天然气成因的差异, 其中, 普光气田主要捕获了龙潭组烃源岩生成的天然气, 混有志留系生成的原油裂解气, 而渡口河、铁山坡、罗家寨等以志留系生成的原油裂解气为主, 并混有龙潭组烃源岩生成的天然气.

关键词 飞仙关组 气田群 气源 硫化氢 TSR 四川盆地

天然气在生成和运移和聚集过程中, 其碳同位素组成具有明显的继承性, 并且随热演化程度而发生稳定变化^[1~5]. 碳同位素的这种特性使其成为判别天然气成因、追索生气母质、进行气源对比、推算天然气成熟度、确定天然气运移方向和距离等方面的有效手段^[6]. 但是多种成因气或多期热成因气的充注和混合、或次生蚀变作用(如 TSR)等, 都将引起气藏中天然气碳同位素指纹的变化^[7~13], 在这种情况下, 依据天然气碳同位素来进行气源分析必须慎重.

四川盆地是中国重要的含气盆地之一, 已探明天然气地质储量超过 $13000 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[14], 居中国第二, 占全国探明天然气地质储量的四分之一. 迄今已在自上震旦统灯影组、中石炭统黄龙组、二叠系、中-下三叠统海相至上三叠统、中-下侏罗统陆相等 20 多个层系均有发现, 气藏约 300 余个^[15]. 近年来, 在川东北地区下三叠统飞仙关组发现了多个高含硫化氢的大型鲕粒岩气藏, 天然气探明储量超过 $5000 \times 10^8 \text{ m}^3$. 关于飞仙关组气源、储层、成藏等研究已成为人们关注的热点. 由于川东北地区烃源岩层多, 且演化程度高, 特别是天然气受到 TSR 的蚀变改造^[11], 天然气原始组分与碳同位素面貌受到很大影响, 给气源的确定带来困难. 本次研究是在大量样品分析的基础上, 通过对油气地质、烃源岩分布与演化、烃类充注史与成藏演化史、以及天然气混合作用与次生蚀变等

方面的综合研究分析, 初步确定了飞仙关组高含硫化氢气藏群的主力气源层.

1 地质背景与高含硫化氢气田的特征

四川盆地是扬子准地台西部一个呈北东向延展的菱型构造兼沉积型含油气盆地(图 1), 震旦纪至中三叠世的海相碳酸盐岩和晚三叠世至始新世的陆相碎屑岩沉积组合的大型复合含油气盆地, 沉积总厚度约 8000~12000 m, 盆地面积 $19 \times 10^4 \text{ km}^2$. 飞仙关组高含硫化氢气藏群位于四川盆地东北部达州-开县以北、万源县以南地区(图 1), 储层主要发育在飞仙关组飞一段至飞三段的蒸发岩台地边缘相的鲕粒白云岩, 有效储层厚度大多在 40~300 m, 孔隙度平均在 6%以上, 其中普光气田优质储层厚度最大, 超过 100 m, 孔隙度高达 16%, 飞仙关组储层埋深在 3500~6000 m. 飞仙关组气藏群在印支-早燕山期大体位于开江古隆起的西北上斜坡, 古构造隆起可能对该区油气的早期运移和聚集有一定的控制作用. 这些气藏的盖层主要有两套: 一套是飞仙关组顶部飞四段以及嘉陵江组和中三叠统雷口坡组发育的膏盐岩类盖层, 厚度在 400~500 m 左右, 膏盐岩因其岩性致密、可塑性强, 是飞仙关组最重要的盖层; 另一套是上三叠统须家河组及其以上的陆相泥质岩类盖层.

目前已在川东北地区飞仙关组发现了普光、罗家

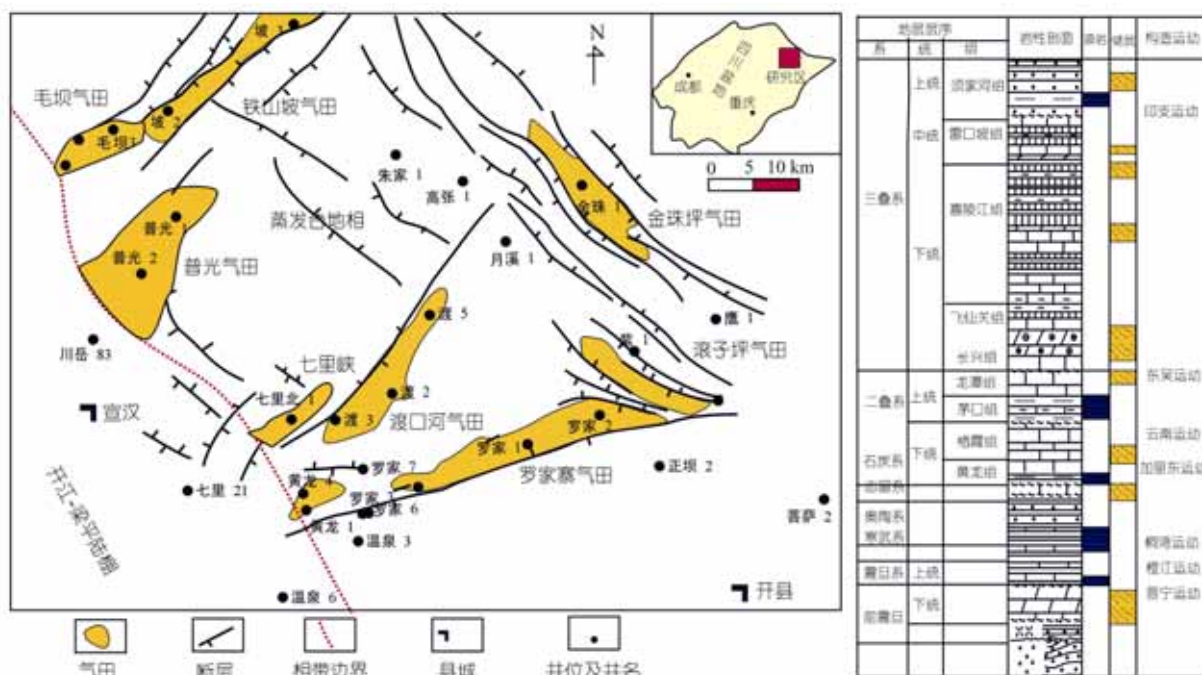


图 1 川东北飞仙关组高含硫气田分布及川东地区地层综合柱状图

寨、铁山坡、渡口河、毛坝等 5 个高含硫化氢大型气田, 以及滚子坪、金珠坪等中小型高含硫化氢气藏(图 1, 表 1)。这些气田都属于构造-岩性复合型圈闭, 储层性质属于孔隙型储层, 次生孔隙十分发育, 可能与硫化氢对碳酸盐岩的溶蚀改造有关^[16]。另外在川东北飞仙关组还发现了铁山、福成寨、沙罐坪等低含或微含硫化氢的小型气藏, 储层性质较差, 以裂缝型储层为主(图 1, 表 1)。

2 飞仙关组天然气的组分特征

飞仙关组天然气具有两个显著特点: 一是天然气很干, 乙烷以上重烃含量甚微; 二是天然气中非烃含量很高。普光、罗家寨、铁山坡、渡口河等气田的天然气干燥系数 $C_1/(C_1+C_2+C_3)$ 一般在 0.998 以上, 甲烷含量一般在 80% 左右, 乙烷以上的重烃类含量多数在 0.1% 以下, 平均为 0.07%, 丙烷含量几乎检测不到(表 1)。

天然气中非烃含量较高, 主要有硫化氢和二氧化碳, 二者合计占天然气体积组分的 21.4%, 其中硫化氢含量一般在 7%~17%, 二氧化碳含量在 5%~9% (表 1)。中国虽然在华北晋县赵兰庄地区发现了高含硫化氢的天然气^[17], 但是硫化氢主要是赋存在油藏中, 且规模有限。川东北飞仙关组气藏群是中国目前发现的硫化氢含量比较高的大型天然气田群, 是硫化氢储量最大的气藏^[15]。另外, 非烃中还含有少量氮气、氦气和氢气等。在达州以西地区还发现了储量规

模不大的低含硫化氢气藏(福成寨、铁山等气藏), 天然气干燥系数相对较低, 重烃含量在 0.25 左右, 非烃含量也较低(表 1)。

3 飞仙关组天然气的同位素组成及成因

3.1 飞仙关组天然气甲烷碳同位素组成特征

川东北地区飞仙关组天然气甲烷碳同位素值分布较为集中, $\delta^{13}C_1$ 为 $-29.5\text{‰} \sim -32.09\text{‰}$, 乙烷碳同位素值相对较宽, $\delta^{13}C_2$ 主要在 $-27.7\text{‰} \sim -33.8\text{‰}$ (表 2)。由于天然气较干, 丙烷含量甚微, 无法获取其同位素, 目前只能依靠甲烷和少数气样的乙烷碳同位素来进行成因分析。为了对比, 这里把川南威远震旦系气藏和川中磨溪雷口坡组气藏和嘉陵江组气藏、以及川西须家河组气藏天然气的组分和同位素数据^[18~24]都编制在图 2 中。各层系天然气的组成与同位素存在较大差异, 反映了四川盆地天然气来源与成因的复杂性。可以看出, 飞仙关组天然气甲烷的碳同位素很重, 在四川盆地天然气中几乎是最重的(图 2(a)), 而乙烷的碳同位素则介于油型气和煤成气之间。

3.2 TSR 对天然气干燥系数的影响

TSR(硫酸盐热化学还原作用)是指硫酸盐与烃类作用, 将硫酸盐矿物还原生成 H_2S 等酸性气体的过程,

表 1 川东北飞仙关组天然气的组分组成特征

气田	井号	层位	井段/m	天然气组分(%)								(C ₁ /C ₁₊)
				CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	H ₂ S	CO ₂	N ₂	H ₂	He	
渡口河	渡 1	T ₁ f	4300	80.10	0.08	0.03	12.80	6.54	0.43	0.02	0.02	0.9986
		T ₁ f	4330	82.70	0.04	0.04	16.20	3.46	0.42	0.12	0.01	0.9990
	渡 2	T ₁ f	4374	78.70	0.04	0.01	16.20	3.29	1.60	0.06	0.02	0.9994
	渡 3	T ₁ f		73.70	0.06	0.05	17.10	8.27	0.74	0.05	0.01	0.9985
	渡 4	T ₁ f	4211	83.70	0.06		9.81	5.03	0.65	0.70	0.02	0.9993
罗家寨	渡 5	T ₁ f	4790	72.90	0.05		15.90	4.19	2.35	4.31	0.25	0.9993
	罗家 1	T ₁ f	3487	75.30	0.11	0.06	10.50	10.40	0.18	3.45	0.01	0.9977
	罗家 2	T ₁ f	3246	84.70	0.08	0.03	8.77	5.44	0.71	0.27	0.02	0.9987
	罗家 4	T ₁ f	3584	84.50	0.08		7.13	5.13	0.56	2.59	0.02	0.9991
	罗家 5	T ₁ f		76.70	0.05		13.70	8.93	0.59	0.01	0.02	0.9993
	罗家 6	T ₁ f	3905	85.00	0.09		8.28	6.21	0.45	0.00	0.02	0.9989
	罗家 7	T ₁ f	3906	81.40	0.07		10.40	6.74	1.34	0.06	0.02	0.9991
	罗家 9	T ₁ f	3158	79.90	0.05		14.30	5.42	0.33	0.04	0.02	0.9994
	罗家 11	T ₁ f	3900	82.40	0.03		9.12	6.97	1.48	0.02	0.02	0.9996
普光	普光 1	T ₁ f		96.90	0.09			2.53				0.9991
		T ₁ f	5610	77.50	0.02		12.70	9.10	0.62	0.04	0.01	0.9997
		T ₁ f		5062	75.60	0.11	15.80	7.96	0.44	0.03	0.01	0.9985
		T ₁ f		4958	74.30	0.22	17.20	7.90	0.42	0.01	0.01	0.9970
	普光 2	T ₁ f		4911	76.02	0.02	15.58	7.81	0.44	0.01	0.01	0.9997
		T ₁ f ³⁻¹			75.09	0.02	14.60	9.04	1.00			0.9997
		P ₂ ch	5315		74.20	0.02	16.00	9.46				0.9997
		P ₂ ch			74.22	0.02	15.96	9.46				0.9997
	普光 4	P ₂ ch	5259	75.00	0.33		15.40	8.73	0.47	0.02	0.01	0.9956
		T ₁ f	5770	73.80	0.03		17.10	8.47	0.59	0.00	0.02	0.9996
	普光 6	T ₁ f		5044	74.70	0.03	14.10	10.50	0.65	0.06	0.01	0.9996
		P ₂ ch	5240	75.90	0.05		14.70	8.74	0.49	0.06	0.01	0.9990
铁山坡	坡 1	T ₁ f	3430	78.40	0.05	0.02	14.20	6.36	0.92			0.9990
		T ₁ f		3419	81.00	0.07	10.90	7.01	0.98	0.01	0.03	0.9990
	坡 2	T ₁ f	4135	78.50	0.05	0.03	14.50	5.87	0.98			0.9990
	坡 4	T ₁ f	3380	76.90	0.04		14.20	7.62	0.95	0.28	0.02	0.9990
七里北	七里北 1	T ₁ f	5800	77.90	0.50		16.30	3.73	0.50			0.9940
	龙会场	T ₁ f ³⁻¹		3844	90.79	0.10	3.31	5.13				0.9989
	高峰场	T ₁ f ³⁻¹	3893	88.90	0.11		8.05	2.37				0.9988
	黄龙场	T ₁ f ³⁻¹			95.46	0.19	0.41	3.58				0.9980
	福成寨	成 16	2781	98.75	0.37	0.02	0.114	0.001	0.700	0.000	0.034	0.9961
	福成寨	成 22	3040	98.84	0.25	0.01	0.090	0.090	0.690	0.000	0.028	0.9974
	铁山	铁山 11	2970	97.99	0.23	0.1	0.740	0.670	0.480	0.000	0.028	0.9966
	铁山	铁山 21	2918	97.64	0.22	0.01	0.590	0.570	0.940	0.000	0.027	0.9976
	铁山	铁山 5	2921	98.60	0.23	0.01	0.020	0.600	0.510	0.000	0.027	0.9976

它是高含 H₂S 天然气形成的重要机制^[27~29]。大量研究结果表明^[30~32]，川东北飞仙关组、嘉陵江组以及威远震旦系气藏和寒武系气藏的硫化氢均属于 TSR 成因。由于 TSR 是热动力驱动下烃类和硫酸盐之间的反应，因此伴随着烃类的氧化蚀变，烃类气体的组分和碳同位素则会发生相应的变化^[11]。从图 2(b)来看，随硫化氢含量的增高，天然气的干燥系数(C₁/C₁₊)愈来愈高，飞仙关组天然气硫化氢含量最高，天然气的干燥系数也是最高的。因此飞仙关组天然气干燥系

数的增大不仅仅是由于成熟度造成的，TSR 过程对其也有重要影响。

由于不同烃类的化学活性存在明显差异，因此与硫酸钙发生 TSR 所构成的反应体系的活化能也不相同。不同温度 and 不同烃类发生 TSR 反应的活化能差别较大，烃类的碳数越高，吉布斯自由能(Δ_rG)越小，反应越容易进行，即丁烷比丙烷容易发生 TSR，丙烷又比乙烷容易，甲烷 Δ_rG 最大，因此反应难度也最高^[11]。这表明 TSR 对烃类的消耗作用具有选择性：

表 2 川东飞仙关组高含硫化氢气藏与低含硫化氢气藏烃类碳同位素组成特征

气田	井号	层位	井段/m	H ₂ S (%)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)		数据来源
					CH ₄	C ₂ H ₆	
七里北 高峰场 普光	七里北 1 峰 15	T ₁ f	5800	16.3	-30.10		本文
		Tf	3893	8.05	-29.50		
	普光 2	T ₁ f	4911	15.58	-30.89	-28.49	[25]
		Tf ³⁻¹		14.6	-30.20		
		T ₁ f	5062	15.8	-31.00	-28.80	本文
		T ₁ f	4958	17.2	-30.50	-29.10	
		P ₂ ch		15.96	-30.10		[25]
		P ₂ ch	5315	16	-30.60	-25.20	
		P ₂ ch	5259	15.4	-30.10	-27.70	本文
渡口河	渡 6	T ₁ f		41.4	-30.50		[26]
	渡 4	T ₁ f	4211	9.81	-29.80	-32.40	
	罗家寨	T ₁ f	3905	8.28	-30.40		本文
		T ₁ f	3906	10.4	-30.30	-29.40	
铁山坡	坡 1	T ₁ f	3430	14.2	-30.10		[26]
	坡 2	T ₁ f	4135	14.5	-29.50		
	龙会场	T ₁ f	3844	3.31	-29.60		本文
	黄龙场	T ₁ f		0.41	-33.60		
福成寨	成 16	T ₁ f	2781	0.114	-31.43	-30.00	[26]
	成 22	T ₁ f	3040	0.09	-32.03		
	铁山	T ₁ f	2970	0.74	-32.05	-33.80	[26]
	铁山	T ₁ f	2918	0.59	-31.63		
	铁山	T ₁ f	2921	0.02	-32.09	-33.70	[26]
	铁山	T ₁ f					

即重烃类易于或优先发生 TSR 反应, 甲烷难以发生 TSR 反应, 从而造成天然气干燥系数的增大.

3.3 TSR 对天然气碳同位素蚀变作用

从图 2(c), (d)中可以清晰看出, TSR 过程对天然气甲烷、乙烷的碳同位素有重要影响: 硫化氢含量越高, 碳同位素越重. 特别是川东北飞仙关组一些裂缝型气藏, 未能发生 TSR 形成硫化氢, 这些气藏的充注成藏过程可能与飞仙关组孔隙型高含硫化氢气藏相似, 气源可能一致. 因此相同气源的高含硫化氢天然气与低含硫化氢天然气的碳同位素与硫化氢的关系表现得最为明显(图 2(c), (d)中的小图). 由于 ¹²C-¹²C 与 ¹³C-¹³C 之间的键能不同, 在热力(120 °C 以上的高温条件)驱动下, 烃类和 SO₄²⁻之间发生 TSR, 伴随着烃类的氧化而发生碳同位素的分馏, 这是由于 ¹²C-¹²C 键优先断裂, ¹²C 更多参与了 TSR 反应, 而 ¹³C 则更多保留在残留的烃类中, 使反应残留的烃类相对富集 ¹³C. 由于重烃类易于发生 TSR, 因此重烃类的碳同位素通常情况下增重幅度比甲烷大. 从图 2(c), (d)可以看出高含硫化氢天然气比低含硫化氢天然气的甲烷碳同位素重 2‰左右, 乙烷增重 4.0‰左右. 由此来看, 飞仙关组天然气排除 TSR 蚀变的影响, 同位素组成应为: $\delta^{13}\text{C}_1$ 为-33‰ ~ -31‰, $\delta^{13}\text{C}_2$ 在-34‰ ~

-30‰, 分布在图 2(a)上的二叠系与嘉陵江组、雷口坡组交汇的区域.

4 川东北飞仙关组气藏气源岩分析

4.1 飞仙关组天然气与其他层系天然气的比较

四川盆地产气层较多, 特别是川东地区, 包括石炭系、上二叠系、下三叠系飞仙关组、嘉陵江组主力产层和下二叠统、中三叠统雷口坡组等低产气层^[33,34]. 比较这些不同时代产层中天然气的地球化学特征将有助于确定飞仙关组天然气的来源.

() 石炭系天然气. 石炭系是川东地区非常重要的产气层, 已发现了卧龙河气田、五百梯气田、沙坪场气田等一大批大中型气田. 石炭系天然气以干气为主(但没有飞仙关组天然气干燥系数大), 乙烷含量多数在 0.3%~0.8%左右, 丙烷含量多数在 0.05%左右, 基本上不含丁烷及以上重烃. 天然气中含有少量硫化氢, 其含量小于 1%, 主要分布在 0.1%~0.4%, 平均在 0.2%(图 2); 二氧化碳含量较低, 一般在 1%~3%, 平均在 1.5%左右. 石炭系天然气同位素分布比较稳

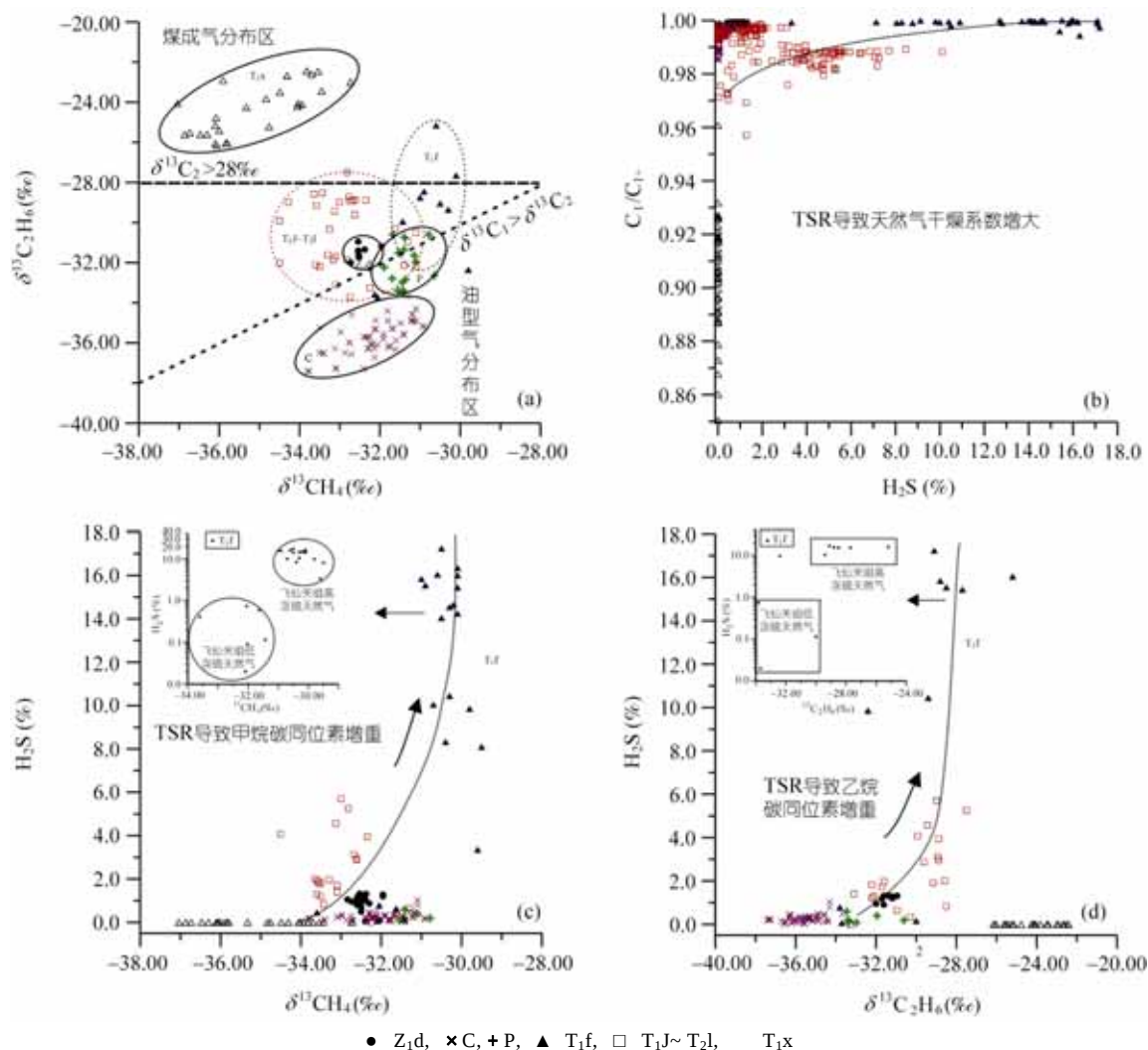


图2 四川盆地各层系天然气组分与碳同位素间的关系

(a) 甲烷与乙烷碳同位素组成间的关系; (b) H_2S 含量与天然气干燥系数间的关系; (c) H_2S 含量与甲烷 $\delta^{13}C$ 之间的关系; (d) H_2S 含量与乙烷 $\delta^{13}C$ 之间的关系

定和集中,大量样品分析表明:甲烷碳同位素主要分布在 $-34\text{‰} \sim -31\text{‰}$,乙烷碳同位素在 $-34\text{‰} \sim -38\text{‰}$,而且几乎所有石炭系天然气的甲、乙烷碳同位素都出现倒转,即: $\delta^{13}C_1 > \delta^{13}C_2$ (图 2(a)).从碳同位素的分布情况来看,石炭系总体呈现出油型气特点,碳同位素组成明显轻于飞仙关组天然气.由于石炭系储层沥青十分发育,因此通常认为其中天然气为原油裂解气,来源于川东北地区上奥陶统五峰组至下志留统龙马溪组海相烃源岩^[35~37].

() 二叠系天然气.川东二叠系产层包括下二叠统栖霞组、茅口组、上二叠统龙潭组、长兴组等,气藏规模较小,以裂缝型气藏为主.除普光气田由于长兴组气藏与飞仙关组气藏连通,二者天然气组分与碳同位素组成一致外(表 2),川东地区其他二叠系气藏中天然气较干,同位素分布也比较集中,与普光气

田的碳同位素组成存在明显差异(图 2(a)),与石炭系气藏天然气也存在较大的差异,表明这些天然气的来源与石炭系中天然气的来源不同.

下二叠统栖霞组、茅口组主要发育碳酸盐岩,夹少量泥岩,有机碳含量一般低于 1.0%,甚至多数在 0.5%以下,其干酪根碳同位素组成通常比上古生界烃源岩的重 1‰~2‰以上.由于川东地区石炭系天然气来源于上奥陶统五峰组至下志留统龙马溪组海相烃源岩,二叠系天然气碳同位素组成又比石炭系天然气的重,显然二叠系地层中的天然气不是来源于上古生界烃源岩,而应该主要来源于二叠系本身,其中也不排除有少量上古生界烃源岩的贡献.

() 下三叠统嘉陵江组、雷口坡组天然气.下

三叠统嘉陵江组气藏在川东地区分布较广, 主要以裂缝型储层为主; 其中在以孔隙型储层为主的卧龙河等气田发现了高含硫化氢的天然气, 硫化氢含量在 4%~7% 之间; 其他近 20 个气藏大多都以裂缝型储层为主, 它们以低含、微含或不含硫化氢为特征(图 2(b)). 川东地区嘉陵江组气藏天然气的组成成分差异较大(图 2(b)), 除卧龙河气田硫化氢含量较高、湿气含量相对较高外, 其他嘉陵江组大部分气田甲烷的含量都在 94% 以上, 重烃含量一般较低, 乙烷含量在 0.5% 左右, 丙烷含量一般小于 0.2%, 丁烷大多数在 0.004% 左右. 川东雷口坡组天然气组分、同位素等特征与嘉陵江组气藏相近.

嘉陵江组和雷口坡组烃类碳同位素组成分布较宽, 反映了天然气气源较为复杂. 卧龙河嘉陵江组高含硫化氢气藏天然气甲烷的碳同位素在 -34‰ ~ -32‰ 左右, 比普光气田飞仙关组天然气轻 2‰ 以上, 但其乙烷的碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_2$ 在 -30.5‰ ~ -28‰ , 与普光气田飞仙关组天然气类似. 其他低含硫化氢天然气乙烷碳同位素组成与二叠系中天然气相似, 甲烷略轻于二叠系地层中的天然气. 总体来看, 嘉陵江组和雷口坡组天然气来源比较复杂, 应该为多源混合天然气.

() 上三叠统须家河组天然气. 上三叠统须家河组中天然气碳同位素组成(图 2(a))表明其为典型的陆相煤系有机质生成的煤成气^[38~40].

由以上的对比可见, 下三叠统飞仙关组地层中天然气碳同位素组成与上部下三叠统须家河组、下部石炭系地层中天然气存在很大差异, 表明其不是来源于上三叠统须家河组烃源岩, 也不是来源于上奥陶统一志留统烃源岩.

实际上, 飞仙关组天然气在去除 TSR 影响后的碳同位素组成与二叠系地层中低含硫化氢的天然气碳同位素组成类似, 前者 $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 -33‰ ~ -31‰ , $\delta^{13}\text{C}_2$ 在 -34‰ ~ -30‰ ; 后者 $\delta^{13}\text{C}_1$ 在 -32‰ ~ -30.5‰ , $\delta^{13}\text{C}_2$ 在 -33‰ ~ -30‰ . 因此, 飞仙关组天然气应与二叠系烃源岩具有良好的亲缘关系. 川东地区烃源岩的发育情况进一步表明, 飞仙关组天然气主要来源于二叠系, 而且主要是上二叠统龙潭组烃源岩, 部分来源于上奥陶统一志留统烃源岩.

4.2 川东北地区烃源岩与天然气气源关系分析

川东地区发育了下寒武统、下志留统、下二叠统、

上二叠统等多套烃源岩, 但是烃源岩的分布范围、生烃潜力、成烃演化历史等存在较大差异, 因此对该区飞仙关组气藏的贡献也不同.

() 下寒武统筇竹寺组烃源岩. 下寒武统筇竹寺组烃源岩在川南最发育, 其次在四川盆地川东北以北的南江-镇巴地区一带发育, 而在川东北飞仙关组气藏分布的宣汉-开县等地区的下寒武统烃源岩相对较差(图 3), 烃源岩厚度在 40 m 左右, 而且在海西晚期-印支早期已进入干气阶段, 而此时下三叠统飞仙关组的圈闭尚未形成(图 4). 因此, 从烃源岩生烃与排烃时间及飞仙关组圈闭形成时间来看, 下寒武统烃源岩可能对三叠系飞仙关组中天然气没有太大的贡献.

() 志留系龙马溪组烃源岩. 上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组发育黑色富含笔石的页岩和泥岩, 有机碳含量平均在 2% 左右, 在川东地区广泛分布, 其中在宣汉-开县以东及以南地区厚度较大, TOC 较高, 石炭系的大气藏均分布在此区. 在宣汉-开县以北地区该套烃源岩的厚度明显减薄, 发育程度相对差一些, 厚度在 30~60 m 左右(图 3). 该套烃源岩在晚三叠进入生油高峰, 飞仙关组的岩性圈闭在三叠末期逐渐形成(图 4), 烃源岩热演化生烃期与飞仙关组圈闭的形成较为匹配(图 4), 因而可能对飞仙关组气藏有重要贡献. 此时构造高部位在渡口河-铁山坡一带, 普光处于构造低部位, 生成的油气更多运移到渡口河-铁山坡一带的圈闭高部位成藏. 这也是目前在渡口河、铁山坡、罗家寨等飞仙关组储层中见到大量沥青, 而普光气田仅在普光 2 井飞仙关组储层高部位见到沥青和普光 6 井储层沥青不发育的原因.

在燕山中期, 随着盆地下沉, 古油藏开始逐渐裂解(志留系液态烃开始裂解成气, 硫化氢也开始大量生成). 飞仙关组储层中发育的沥青的生物标志物组成与石炭系储层沥青的生物标志物也比较相似¹⁾, 进一步表明五峰组-龙马溪烃源岩生成的原油在飞仙关组形成了油藏, 后期裂解形成了天然气.

() 下二叠统烃源岩. 下二叠统烃源岩主要由碳酸盐岩组成, 虽然厚度大(200 m 以上), 但有机质丰度很低, 在宣汉-开县一带烃源岩的 TOC 一般小于 0.5%, 因此生烃潜力有限, 对飞仙关组天然气藏不可能有大的贡献.

1) 梁狄刚、陈建平、赵喆, 等. 南方复杂构造区有效烃源岩评价. 研究报告, 中国石化南方勘探开发公司内部资料

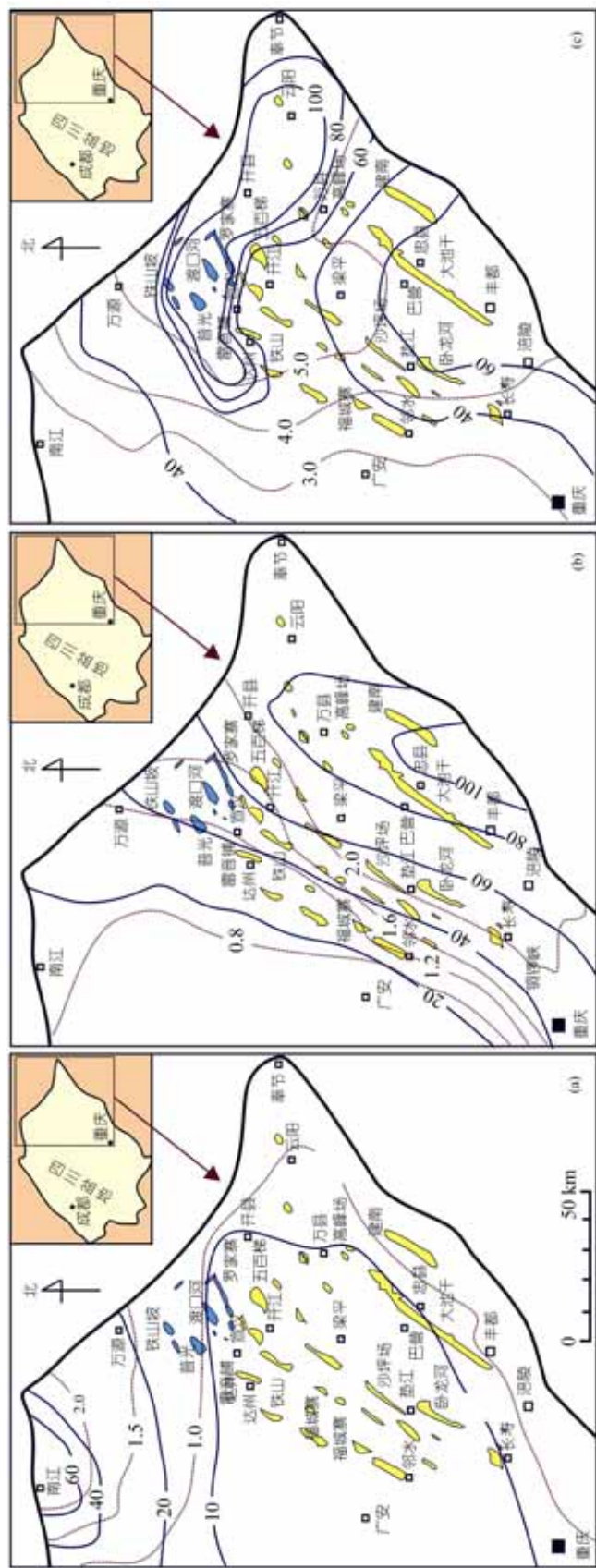


图3 川东地区寒武系、龙马溪组、龙潭组烃源岩等厚度图与TOC含量等值线图
(a) 寒武系烃源岩厚度(m)与TOC含量(%)等值线图; (b) 龙马溪组烃源岩厚度(m)与TOC含量(%)等值线图; (c) 龙潭组烃源岩厚度(m)与TOC含量(%)等值线图

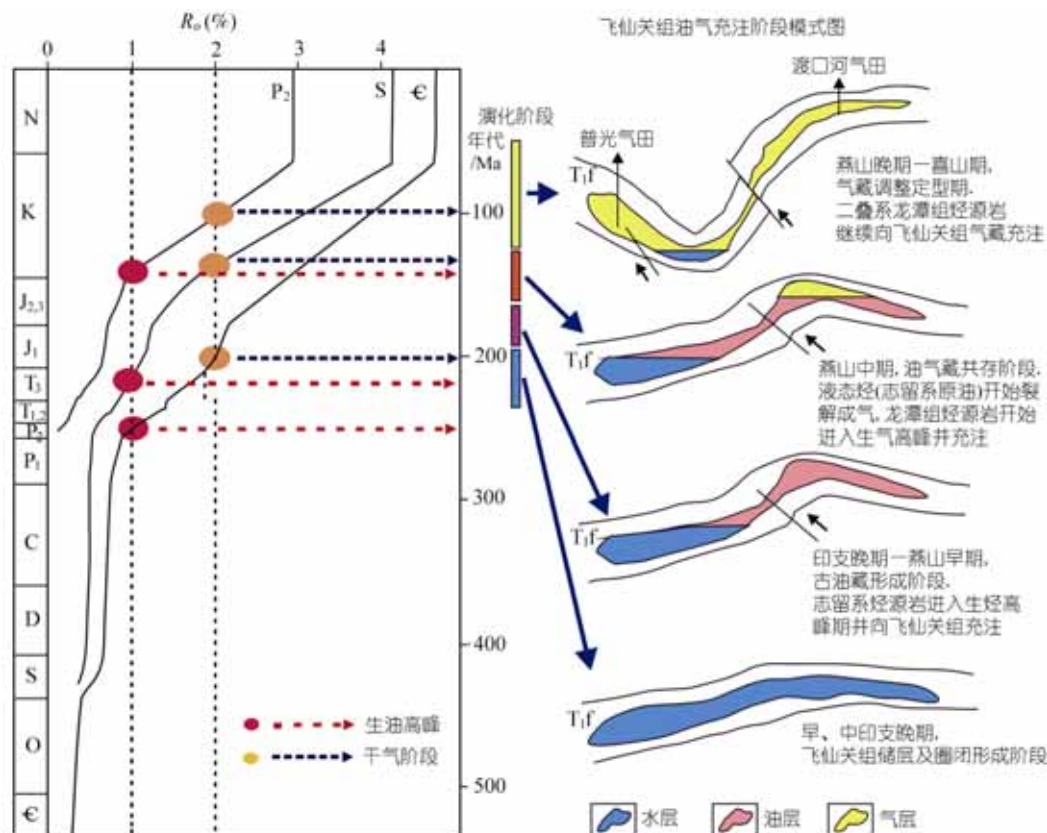


图 4 川东北三套烃源岩成熟度演化史与飞仙关组气藏充注阶段模式图

() 上二叠统龙潭组烃源岩。上二叠统龙潭组为海陆过渡相沉积, 由碳酸盐岩和煤系泥岩、碳质泥岩和煤组成, 其中碳质泥岩、泥岩的厚度在普光气田分布区大于 100 m^1 , 而且泥岩的有机碳含量在 3% 以上(图 3), 碳质泥岩的有机碳含量更高。而且, 龙潭组烃源岩目前的 R_o 在 1.9%~2.9% 之间, 已进入高成熟演化阶段, 在地质历史时期其生烃量巨大。

从烃源岩的热演化过程与圈闭形成时间匹配来看, 其生烃高峰在晚侏罗与早白垩之间, 而此时正是飞仙关组气藏进行调整改造和定型的关键时期(图 4), 具有捕获龙潭组烃源岩生成天然气的最佳机会, 从而使普光气田捕获了大量龙潭组烃源岩形成的天然气。因此, 龙潭组烃源岩应该是飞仙关组天然气藏的主要气源之一。

另一方面, 龙潭组虽然为海陆交互相含煤沉积, 但煤并不发育, 其有机质主要为 Ⅱ型¹⁾, 其生成的天然气既不同于典型腐殖煤形成的天然气, 也不同于典型腐泥型有机质生成的天然气, 因此其形成的天然气的碳同位素相对较轻, 没有呈现典型的煤成气特征。

5 结论

飞仙关组天然气组分与同位素组成复杂, 主要受 TSR 蚀变与高热演化的双重影响, 从而造成飞仙关组天然气成为高含硫化氢的干气; 碳同位素组成明显偏重, 排除 TSR 和高成熟的影响, 飞仙关组天然气在成藏时期甲、乙烷的碳同位素应在: $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 $-34.5\text{‰} \sim -32\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}_2$ 在 $-34\text{‰} \sim -30\text{‰}$ 左右。

川东北地区发育多套烃源岩, 从烃源岩的发育范围、生烃潜力、热演化特征来看, 上二叠统龙潭组烃源岩和志留系龙马溪组烃源岩均可能作为飞仙关组的重要气源。由于龙潭组形成于海-陆交互相沉积, 其形成的天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 在 $-34\text{‰} \sim -32\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}_2$ 在 $-30.5\text{‰} \sim -28\text{‰}$; 志留系龙马溪组烃源岩生成的天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 在 $-34\text{‰} \sim -31\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}_2$ 在 $-34\text{‰} \sim -38\text{‰}$; 而飞仙关组天然气碳同位素恢复后, $\delta^{13}\text{C}_1$ 和 $\delta^{13}\text{C}_2$ 正好介于二者之间, 据此推测飞仙关组的气源主要来的

1) 见 91 页脚注

自龙潭组和龙马溪组。

圈闭的形成演化、油气聚集成藏过程及其与烃源岩热演化过程分析表明,飞仙关组气藏的主力气源是二叠系龙潭组烃源岩,其次是志留系龙马溪组烃源岩。由于圈闭形态与不同烃源岩生排烃时期的耦合匹配,造成各气藏天然气成因的差异,其中,普光气田主要捕获了龙潭组烃源岩生成的天然气,混有志留系生成的原油裂解气,而渡口河、铁山坡、罗家寨等应以志留系形成的原油裂解气为主,并混有大量龙潭组烃源岩生成的天然气。储层沥青的发育情况及各气藏天然气碳同位素的差异间接证实了天然气来源的差异。

参 考 文 献

- 1 Stahl W. Carbon isotope fractionation in natural gases. *Nature*, 1974, 251: 134—135
- 2 James A T. Correlation of natural gas by wet of carbon isotopic distribution between hydrocarbon components. *AAPG Bull*, 1983, 67: 1176—1191
- 3 Schoell M. Recent advance in petroleum isotope geochemistry. *Org Geochem*, 1984, 6: 645—663
- 4 Galimov E. Sources mechanisms of formation of gaseous hydrocarbon on sedimentary rocks. *Chem Geol*, 1988, 71: 77—95
- 5 戴金星, 陈英. 中国生物气中烷烃组分的碳同位素特征及其鉴别标志. *中国科学, B 辑*, 1993, 23(3): 303—310
- 6 Dai J, Yang S, Chen H, et al. Geochemistry and occurrence of inorganic gas accumulations in Chinese sedimentary basins. *Org Geochem*, 2005, 36(12): 1664—1688
- 7 James A T, Burns B J. Microbial alteration of subsurface natural gas accumulations. *AAPG Bull*, 1984, 68: 957—960
- 8 Tang Y, Perry J K, Jenden P D, et al. Mathematical modeling of stable isotope ratio in natural gases. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64: 2673—2687
- 9 戴金星. 各类烷烃气的鉴别. *中国科学, B 辑*, 1992, (2): 187—193
- 10 Zhang Shuichang, Zhu Guangyou, Liang Yingbo, et al. Geochemical characteristics of the Zhaolanzhuang sour gas accumulation and thermochemical sulfate reduction in the Jixian Sag of Bohai Bay Basin. *Org Geochem*, 2005, 36(11): 1717—1730
- 11 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. TSR 对烃类气体组分和碳同位素的蚀变作用. *石油学报*, 2005, 26(5): 54—58
- 12 Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Dai Jinxing, et al. Character and genetic types of shallow gas pools in Jiyang depression. *Org Geochem*, 2005, 36(11): 1650—1663
- 13 Prinzhofer A, Pernaton E. Isotopically light methane in natural gas: bacterial inprint of diffusive fractionation? *Chem Geol*, 1997, 142: 193—200
- 14 张水昌, 朱光有. 四川盆地海相天然气富集成藏特征与勘探方向探讨. *石油学报*, 2006, 27(5): 1—8
- 15 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 川东北飞仙关组高含 H_2S 气藏特征与 TSR 对烃类的消耗作用. *沉积学报*, 2006, 24(1): 79—85
- 16 朱光有, 张水昌, 梁英波. TSR & H_2S 对深部碳酸盐岩储层的溶蚀改造作用——四川盆地深部碳酸盐岩优质储层形成的重要方式. *岩石学报*, 2006, 22(8): 1814—1826
- 17 Zhang Shuichang, Zhu Guangyou, Dai Jinxing, et al. TSR and sour gas accumulation: a case study in the Sichuan Basin, SW China. *Geochim Cosmochim Acta*, 2005, 69(Supp): A562—A562
- 18 戴金星, 陈践发, 钟宁宁, 等. 中国大气田及其气源. 北京: 科学出版社, 2003
- 19 胡光灿, 谢姚祥. 中国四川盆地东部高陡构造石炭系气田. 北京: 石油工业出版社, 1997. 63—130
- 20 黄籍中. 四川盆地天然气地球化学特征. *地球化学*, 1984, (4): 307—321
- 21 戴金星, 王廷栋, 戴鸿鸣, 等. 中国碳酸盐岩大型气田的气源. *海相油气地质*, 2000, 5(1-2): 143—144
- 22 戴金星, 卫延召, 夏新宇, 等. 四川盆地天然气的碳同位素特征. *石油实验地质*, 2001, 23(2): 115—121
- 23 刘树根, 徐国盛. 川东石炭系气藏含气系统研究. *石油学报*, 1997, 18(3): 13—22
- 24 王兰生, 李宗银, 沈平, 等. 四川盆地东部大中型气藏成烃条件分析. *天然气地球科学*, 2004, 15(6): 567—571
- 25 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. *地质学报*, 2005, 79(6): 858—865
- 26 Li Jian, Xie Zengye, Dai Jinxing, et al. Geochemistry and origin of sour gas accumulations in the northeastern Sichuan Basin, SW China. *Org Geochem*, 2005, 36(12): 1703—1716
- 27 Worden R H, Smalley P C, Oxtoby N H. The effects of thermochemical sulfate reduction upon formation water salinity and oxygen isotopes in carbonate reservoirs. *Geochim Cosmochim Acta*, 1996, 60: 3925—3931
- 28 Orr W L. Changes in sulfur content and isotopic ratios of sulfur during petroleum maturation—Study of the Big Horn Basin Paleozoic oils. *AAPG Bull*, 1974, 50: 2295—2318
- 29 Mache H G. Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings - old and new insights. *Sediment Geol*, 2001, 140(1-2): 143—175
- 30 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 川东北地区飞仙关组高含 H_2S 天然气 TSR 成因的同位素证据. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35(11): 1037—1046
- 31 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 四川盆地高含 H_2S 天然气的分布与 TSR 成因证据. *地质学报*, 2006, 80(8): 1208—1218
- 32 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 四川盆地 H_2S 的硫同位素组成及其成因探讨. *地球化学*, 2006, 35(3): 412—422
- 33 戴金星, 秦胜飞, 陶士振, 等. 中国天然气工业发展趋势及其地学理论重要进展. *天然气地球科学*, 2005, 16(2): 127—142
- 34 蔡开平, 王应蓉, 杨跃明, 等. 川西北广旺地区二、三叠系烃源岩评价及气源初探. *天然气工业*, 2003, 23(2): 10—14
- 35 王兰生, 陈盛吉, 杨家静, 等. 川东石炭系碳酸盐岩气藏地球化学特征. *海相油气地质*, 2000, 5(1-2): 133—144
- 36 王兰生, 陈盛吉, 杨家静, 等. 川东石炭系天然气成藏的地球化学模式. *天然气工业*, 2002, 22(增刊): 102—106
- 37 魏小微, 陈盛吉, 王丽英, 等. 川东石炭系气藏成藏系统研究. *天然气工业*, 2002, 22(增刊): 33—39
- 38 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 四川盆地天然气特征及其气源. *地质前缘*, 2006, 13(2): 234—248
- 39 叶军, 王亮国, 岳东明. 从新场沥青地化特征看川西天然气资源前景. *天然气工业*, 1999, 19(3): 18—22
- 40 蒋裕强, 郭贵安, 陈义才, 等. 川中地区须家河组天然气成藏机制研究. *天然气工业*, 2006, 26(11): 1—3