

文章编号:1000-0550(2004)增刊-0033-06

中国天然气晚期成藏的地球化学特征

李 剑 罗 霞 刘人和 胡国艺 谢增业

(中国石油勘探开发研究院廊坊分院 河北廊坊 065007)

摘 要 通过对中国天然气成藏及地球化学特征的研究,提出了中国天然气具有晚期成藏的特征,并根据中国沉积盆地的特点将晚期成藏明确定义为盆地经过多期改造以后的最后一次成藏,并将晚期成藏的天然气分为两种类型,即原生型和改造型,总结了各类原生型及改造型晚期成藏的天然气的地球化学特征。

关键词 天然气 晚期成藏 地球化学特征

第一作者简介 李剑 男 1966 年出生 博士后 地球化学和油气运移

中图分类号 P593 **文献标识码** A

MacGregor^[1]的研究表明,喜马拉雅—阿尔卑斯是全球最主要的成藏期,现有大油田的 50%以上是在 35 Ma 以来就位的。通过对中国主要大、中型气田的研究发现,除鄂尔多斯盆地外,中国其他大、中型气田成藏最终定型期是在喜山期以后。戴金星院士在总结我国大、中型天然气田形成的主控因素时指出,成藏期晚的大、中型圈闭有利于大气田的形成^[2]。这主要由于天然气各组分结构简单,分子、密度、粒度和吸附能力都小,故具有易溶解、易扩散和易挥发的特点。根据动平衡的原理^[3],气藏的形成存在着两个同时发生的过程,即源岩中生成的天然气通过运移进入圈闭;聚集在圈闭中的天然气因扩散等原因不断通过盖层逸散。当来自源岩的补充量大于通过盖层的散失量时,圈闭中的天然气才能不断富集成气藏。天然气一直处于这种“动态平衡”之中。因此,成藏期越晚,天然气的散失时间越短,散失量越少。也说明,晚期的构造运动对现今油气藏的定位起着举足轻重的作用,油气藏形成越晚,所受的改造越少,愈易于保存。关于晚期成藏的涵义,至今没有明确的定义,不同的地质工作者有不同的说法,但他们所说的早晚只是相对的,界限上不明确,因而晚期成藏在概念上不统一^[2,4]。本文所指的晚期成藏是指盆地经过多期改造以后最后一次成藏,不同的盆地在具体时间上不同。本文根据天然气生成—运聚成藏的过程和气源特征,将晚期成藏的天然气分为两种类型,原生型晚期成藏和改造型晚期成藏。并根据各自所述的地质条件总结了两种不同类型原生型气藏的地球化学特征。

1 原生型晚期成藏气藏的地球化学特征

原生型晚期成藏是指天然气成藏期晚,同时天然气藏形成后,未受到改造破坏而保留至今的气藏。气藏主要集中在中、新生代盆地,这些盆地地质演化历史短,生气高峰期均较晚,在源岩生气高峰时期构造活动弱,构造格局基本定形,此时圈闭已形成。盆地内天然气生成—运移—聚集成藏的历史不长,易于聚集原生型晚期成藏的天然气藏。原生型晚期成藏的天然气地球化学特征总结于表 1 中。由于不同类型源岩及源岩在不同演化阶段所生成的天然气特征不同,根据源岩成熟度的不同,原生型晚期成藏气藏分为下述三种。

1.1 源岩未成熟—生物气藏(主要为生物气型晚期气藏)

烃源岩未成熟形成生物气藏,中国生物气藏主要分布在柴达木盆地东部第四系。第四系泥质岩既是下伏地层的盖层又是上覆地层的烃源岩,泥质岩生成的生物气受到上覆盖层的遮挡而在储层中聚集,随着聚集规模的不断增大,气藏突破盖层的封闭,生物气向上一个储层运移。柴达木盆地第四系生物气是在整个生化产甲烷过程中,不断聚集、不断突破、不断散失、不断再聚集的循环中建立起的一种动态平衡。所形成的生物气藏具有天然气甲烷含量高(95%以上),含重烃气(0.35%以下)和二氧化碳低(无或 0.7%以下);碳同位素烃: $\delta^{13}\text{C}_1$ 值为 -65% 或更轻, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值为 -13.27% 至 -21.51% , 二氧化碳为有机成因。

表 1 原生型晚期成藏天然气的地球化学特征

Table 1 Characteristics of primary late stage formed gas fields

盆地	气田	储集层位	气田类型	源岩			圈闭形成期		天然气形成期	CH ₄ / %	C ₂₊ / %	CO ₂ / %	N ₂ / %	C ₁ / (C ₁ +C ₂₊)	δ ¹³ C ₁ / ‰	δ ¹³ C ₂ / ‰	P		
				层位	R ₀ / %	类型	生烃高峰											成期	
							1	2										1	2
柴达木	淮北 1 号	Q	生物气	Q	0.3	■	Q	Q	Q	97.84		0.11		1.000	-66.40				
渤海湾	板桥	E	凝析气	E	0.7~1.0	■ _{2-III}	Ed	Ed	Ed	82.91	13.31			0.862	-42.91	-31.69	0.6828		
塔里木	柯可雅	N	凝析气	J	0.7~1.0	■ _{2-III}	N-Q	N-Q	N-Q	85.63	12.82	0.01	1.82	0.870	-38.20	-26.50	0.72~0.75		
东海	平湖、宝云亭	E	凝析气	E		■	E	E-N	N-now	80.49	15.36	0.94	1.62	0.840	-36.50	-27.80	0.631~0.851		
塔里木	英买 7, 牙哈, 提尔根, 羊塔克	R	凝析气	T-J	0.7~1.0	■	E-N	E-N	E-N	81.42	11.62	0.71	8.28	0.875	-35.10	-23.60			
渤海湾	苏桥-文安	O	凝析气	C-P	0.7~1.35	■	E-N	K	E-N	79.19	17.87			0.816	-39.00	-27.50			
吐哈	红台、丘东	J	凝析气	J	0.55~1.0	■	E-N	E-N	E-N	77.96	17.78			0.816	-40.60	-25.80	0.75~1.0		
准噶尔	呼图壁	E	干气	J	>1.35	■	E-N	E	E	92.92	4.02		1.73	0.958	-31.92	-22.24	0.603 1		
南海	Yal3-1	E	干气	E	>1.35	■	N	N	N-Q	83.2	0.98	1.08	8.12	0.988	-36.96	-26.5			
渤海湾	文留	Es ₄	干气	C-P	>1.35	■	Ng	Ng	Ng	93.11	5.21	0.82	1.24	0.947	-30.3		0.574 8~ 0.603 7		
松辽	汪家屯	K	干气	J	2.0~2.5	■	E	F	E	93.4	2.52	2.99	0.34	0.974	-30.2	-27.3	0.595 4~ 0.575 6		
塔里木	克拉 2	K, E	干气	T-J	2.1~3.0	■	N _{2k}	E-N	N-Q	96.92	0.57			0.994	-27.78	-18.47	0.566 2~ 0.597		

1.2 源岩成熟—高成熟(主要为原生型晚期成藏凝析气藏和原生型晚期成藏伴生气藏)

中国中生代烃源岩根据其母质类型不同,在气源岩成熟阶段所形成的天然气有较大差异,煤系或偏腐殖型气源岩形成凝析气藏,而腐泥型或偏腐泥型母质形成石油伴生气。

1.2.1 原生型晚期成藏凝析气藏

在中国渤海湾盆地、东海第三系,塔里木盆地塔西南凹陷侏罗系,部分地区烃源岩是在沼泽化湖相、含藻类—林质草本相中、大量陆源有机质输入的环境中沉积,生源母质以陆生草本植物为主,烃源岩类型为偏腐殖型(II₂—III),陆源有机质中含有三种富氢显微组成,树脂体、壳质组和镜质组,板桥、塔里木盆地柯克亚、东海平湖、宝云亭、春晓气田,气源岩中均含有大量壳质组分,壳质组在 R₀ 为 0.75%~1.35% 进入生烃高峰,在凝析油液态窗内,凝析油和天然气的产率都比较高,因此,在成熟阶段,往往形成大量陆源凝析(油)气,被同期形成的圈闭捕获而聚集成藏,该类天然气中以烃类气体为主,非烃类气体极少或无,甲烷含量 86%~93%,有一部分重烃气体,含量为 6%~7%,甲烷碳同位素值较轻,处于 -38‰~-42‰。

原生型凝析气藏也出现在煤系烃源岩在成熟阶段形成的产物中,煤系烃源岩主要以产气为主,但在不同阶段形成的产物也不相同,煤系泥岩和煤中均含有不同程度的富氢组分,如渤海湾盆地苏桥—文安、吐哈盆地煤中壳质组含量均较高,最高可达 15% 以上,在成熟阶段形成了煤型凝析气田。主要有:苏桥—文安、台南、丘东、牙哈等,这些气田圈闭形成期在第三系以后,此时,气源岩处于成熟阶段,生成的天然气正好被圈闭

捕获从而聚集成藏。

天然气具有组分较湿,甲烷含量平均为 80% 左右,C₂₊ 以上烃类占 10%~17%,甲烷碳同位素值则由于烃源岩中所含壳质组多少而不同,其中,吐哈和苏桥文安天然气中碳同位素值较轻,而塔里木盆地牙哈、羊塔克、英买 7 天然气中碳同位素值相对较重。

1.2.2 原生型晚期成藏石油伴生气藏

中国新生代沉积盆地,如渤海湾盆地,第三系沉积厚度较大,速度较快,气源岩类型较好,这类气源岩,在成熟阶段生成大量石油及石油伴生气,该类天然气与石油一起运移进入圈闭中形成石油溶解气或气顶气,如渤海湾盆地东营凹陷的平方王气田,特征为组分很湿,重烃气含量很高,天然气碳同位素值和氢同位素值都很轻,甲烷碳同位素值为 -45.2‰~-56.8‰。

1.3 源岩高—过成熟(主要为原生型晚期成藏干气藏)

中国中生代盆地气源岩,在经历快速沉降后,气源岩在短时期内达到高一过成熟阶段,如克拉 2 气田三叠—侏罗系气源岩由于晚第三系上新世库车期以来的快速沉降达到了高一过成熟阶段,R₀ 大于 2%。而克拉 2 气田所属的克拉苏构造带主要发育时期为康村期(5.0 Ma)—第四纪,天然气生气高峰期与圈闭形成期有良好的匹配关系,为高一过成熟原生型干气藏。又如崖 13-1 气田崖城组气源岩底界在 4.1 Ma 进入成熟门限,距今 1.8 Ma 便达到高成熟⁽⁵⁾,现已全部进入高一过成熟阶段,高的地热效应和热演化程度使崖城组含煤地层腐殖型有机质迅速降解产生大量天然气。崖 13-1 圈闭在中新世梅山期末形成,天然气一次充注成藏,也为高一过成熟原生型干气藏。

这类天然气田主要有呼图壁、克拉 2、崖 13-1、汪家屯、文留,它们都具有组分干、碳同位素重的特点。甲烷含量基本大于 90%,甲烷碳同位素值分布于 -27.8% ~ -37% 之间。

克拉 2 气田天然气地球化学特征是天然气晚期成

藏地球特征的典型。天然气成藏期为 5 Ma 以来,天然气具有强、快速充注的特征,在这种成藏条件下,天然气藏极有可能未达到动平衡,其地球化学特征特别是轻烃特征上表现为在不同的井段天然气轻烃差异较大(图 1)。

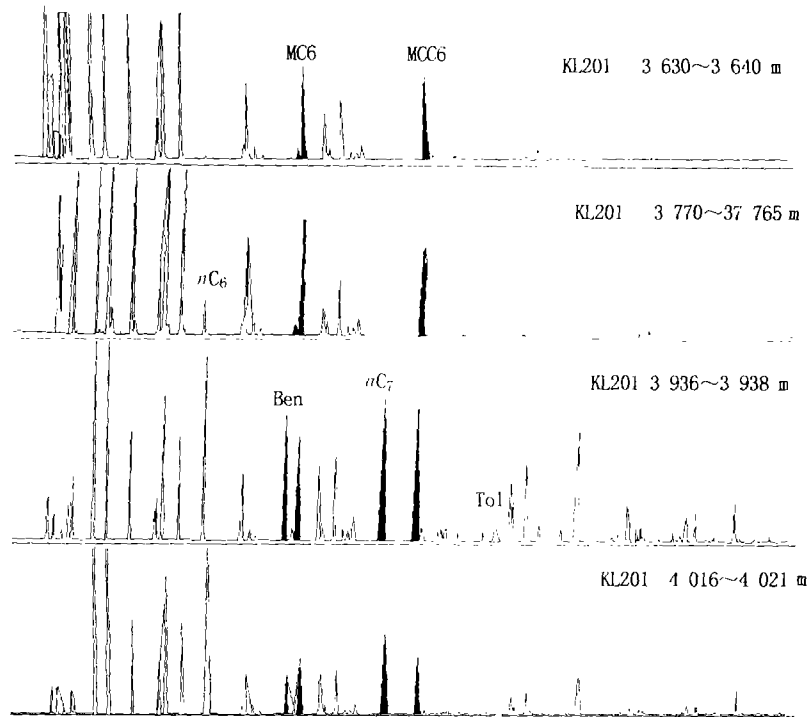


图 1 克拉 2 气田天然气轻烃特征

Fig. 1 Characteristics of gasoline hydrocarbon of KL2 gas field

2 改造型气藏的地球化学特征

改造型晚期成藏天然气是指天然气多次成藏或气源岩多期生烃,但气藏最终定型期较晚。这类气藏主要分布在中国中、西部以及东部的深部地层中,气藏成藏持续的时间普遍较长,且大都经历两次或两次以上的成藏过程,但最终聚集成藏及定型的时间比较晚,以新生代为主。改造型晚期成藏的天然气根据构造活动及气藏富集的主控因素分为三种类型。气藏的主要地球化学特征列于表 2 中。

2.1 构造活动弱的改造型晚期成藏气藏

中国大多数盆地都受到多期构造的强烈影响,只有鄂尔多斯盆地除外,盆地内部无大的断裂体系存在,盆地上古生界气藏产于石炭—二叠系地层中,属自生自储型天然气,气藏盖层为二叠系石千峰组泥岩,天然气在早白垩世末成藏,成藏期相对较早,流体势分析表明,成藏时天然气具有从西、东部向盆地中心及东北运移特征(图 2)。之后虽盆地内未发生大的构造活动,但地层一直处于整体抬升状态,气源岩停止生气,同时盆地由东倾转为西倾。虽自早白垩世末后,石炭—二叠系

气源岩不再大量生烃,但是由于盆地抬升及倾向的改变,天然气发生再调整,调整的结果为,天然气处于整体散失中,天然气具有整体向东、向北运移的特征。鄂尔多斯盆地上古生界天然气气源岩为煤系气源岩,气源岩在生气期时处于为成熟—熟阶段,成藏期时天然气地球化学特征应无太大差别,但是由于气藏在成藏后发生了重新调整,东西天然气在组分及碳同位素仍具有轻微的不同特征(表 2),苏里格天然气甲烷含量为 89.82%,榆林气田天然气甲烷含量为 95.3%,两气田干燥系数分别为 0.911 和 0.972、甲烷碳同位素值分别为 -33.54% 和 -32.9% 、乙烷碳同位素值分别为 -23.88% 和 -25.82% 。天然气组分和碳同位素值的总体特征为组分较湿,碳同位素较重。

2.2 生气期早的改造型晚期成藏气藏

中国盆地由于历经多期构造活动,若气源岩生气期早,极易形成改造型气藏,这类气藏按气藏圈闭位置分为原地改造型晚期成藏气藏和异地改造型晚期成藏气藏。

2.2.1 原地改造型晚期成藏气藏

这类气藏早期常以油藏形式聚集于古隆起中。中

表 2 改造型晚期成藏天然气地球化学特征

Table 2 Characteristics of modified late stage gas fields

盆地	气田	储集天然气				源岩			圈闭形成期		天然气				C ₁ /(C ₁ +C ₂ +) /%	δ ¹³ C ₁ /‰	δ ¹³ C ₂ /‰	ρ		
		层位	类型	R _o /%	类型	生烃高峰		1	2	1	2	形成期	CH ₄ /%	C ₂ ⁺ /%					CO ₂ /%	N ₂ /%
						1	2													
鄂尔多斯	苏里格	P	湿气	C-P	1.0~2.0	Ⅲ	K ₁	/	燕山	/	K ₁ -now	89.82	8.730	1.62	0.47	0.911	-33.46	-23.18	0.618	4
	榆林	P	干气	C-P	1.0~2.0	Ⅲ	K ₁	/	燕山	/	K ₁ -now	95.30	2.700	0.92	1.14	0.972	-33.11	-26.14	0.598	6
	长庆	O	干气	O,C-P	>1.5	I,Ⅲ	T ₃	K ₁	T ₃	K ₁	K ₁ -now	91.90	3.280	3.03	1.76	0.991	-33.79	-24.5~ -36.99	0.591	9
四川	川东	T	干气	P	1.5~2.5	I,Ⅲ	T ₃	J ₂ -K	印支	喜山	喜山	79.77	0.069	5.94	H ₂ S ₂ 13.12	0.999	-30.96	-33.04	0.558	8
	川东	P	干气	P	1.5~2.5	I,Ⅲ	T ₃	J ₂ -K	印支	喜山	喜山	95.94	0.480			0.995	-31.85	-32.02		
	川东	C	干气	S ₁	1.5~3	I	T ₃	J ₂ -K	印支	喜山	喜山	96.60	0.480			0.995	-33.18	-36.32		
塔里木	威远	Z	干气	Z, E ₁	2~4	I	P	J ₂ -K	加里东	喜山	喜山	86.06	0.120	4.80	7.17	0.999	-32.34	-32.58		
	雅克拉	K, E	凝析气	E-O ₁	>2	I	加里东-海西	燕山-喜山	海西-印支	喜山	喜山	83.30	7.760	4.42	4.45	0.914	-40.43	-32.71		
	吉拉克	T, C	干气	E-O ₁	>2	I	加里东-海西	燕山-喜山	海西-印支	N	N	87.1	6.4	1.17	5.5	0.931	-35.68	-34.35	0.65	
四川	河田河	O	干气	E-O ₁	>2	I	加里东-海西	燕山-喜山	海西-印支	喜山	喜山	80.05	1.7	7.2	10~18	0.979	-37.07	-36.65	0.63~ 0.72	
	新场	J	干气	T ₃	1.0~2.3	Ⅲ	J ₃	K		喜山	喜山	95.71	3.4			0.965	-33.62	-23.06		
	川西 T ₃	T ₃	干气	T ₃	1.0~2.3	Ⅲ	J ₃	K	印支	喜山	喜山	96.22	4.1			0.959	-32.60	-22.9		
渤海湾	千米桥	O	凝析气	E	1.3~1.8	Ⅲ	E _d	N _m	T ₃ K ₁	N _m	N _m	85.61	10.03			0.895	-38.44	-24.65	0.658	4
	鄂洲 20-2	Pz, Mz	凝析气	E ₃	>1.0	I,Ⅲ	E _d	N _m	E _d	N _m	N _m	76~92	19			0.84	-34.2	-25.58		

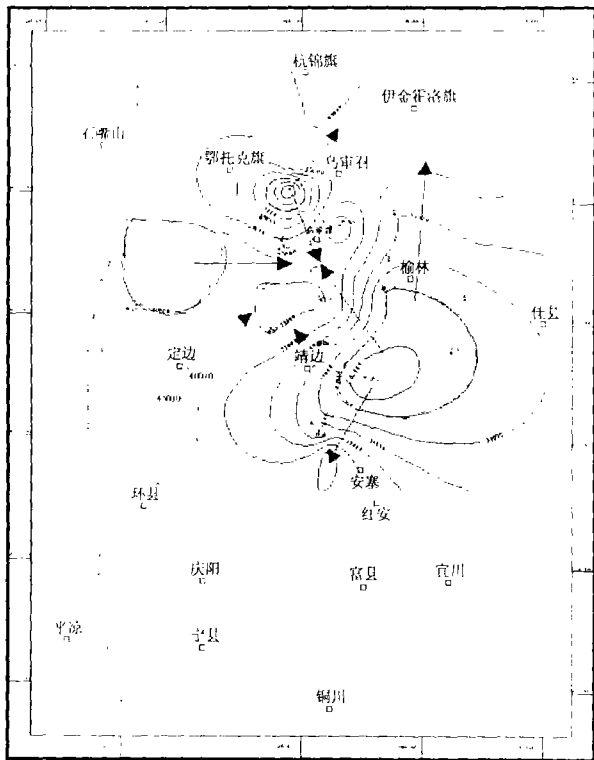


图 2 鄂尔多斯盆地上古生界天然气在早白垩世末的流体势分布及运移方向

Fig. 2 Map showing fluid potential and migration direction of natural gas of Upper Paleozoic during Early Cretaceous stage in Ordos Basin

国中西部古老的气源岩如寒武、奥陶、志留系气源岩，除塔里木盆地中上奥陶统外，大都为腐泥型烃源岩，因此，在生油高峰期时生成大量石油，生成的油气早期大

都聚集于古隆起中，随着后期的构造活动，原油进一步裂解成气。四川盆地二叠系气源岩，在印支期处于生油高峰期(图3)，此时，开江—梁平古隆起已形成，古隆

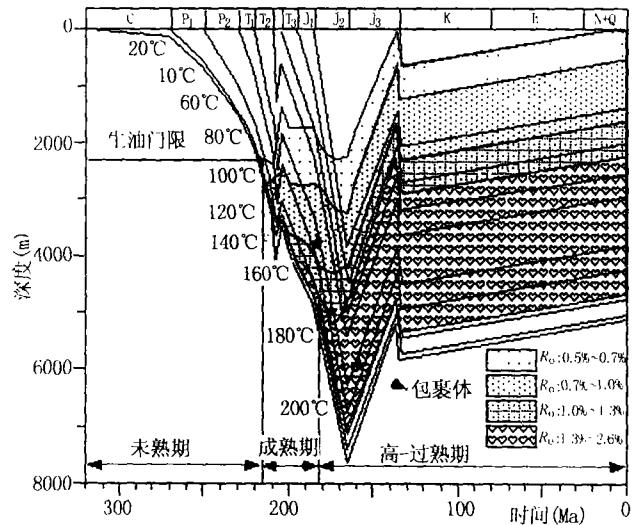


图 3 川东北飞仙关气藏气源岩主要生油、生气期分析
Fig. 3 Main oil and gas generation peak of gas source rock of Feixianguan gas field in northeastern Sichuan Basin

起捕获了印支期生成的石油；随着源岩的进一步演化及燕山、喜山期的构造使圈闭破坏或再形成，早期生成的石油进一步裂解为天然气，气源岩再次演化生成的天然气也进入新形成的圈闭中聚集，罗家寨气田在不同时期的流体势分布特征表明，在天然气生气高峰期，天然气主要运移方向为古隆起方向，但是喜山运动使早期聚集在圈闭中的天然气发生再调整，天然气处于

调整成藏阶段,成藏阶段的流体势特征为在圈闭高点处流体势相对较低,是天然气运移的有利指相区(图4)。天然气具有典型油裂解气的特征(图5),天然气成熟度很高,组分很干,干燥系数达到0.999,具有甲烷碳同位素值(-30.96‰)重于乙烷碳同位素值(-33.04‰)的特征。

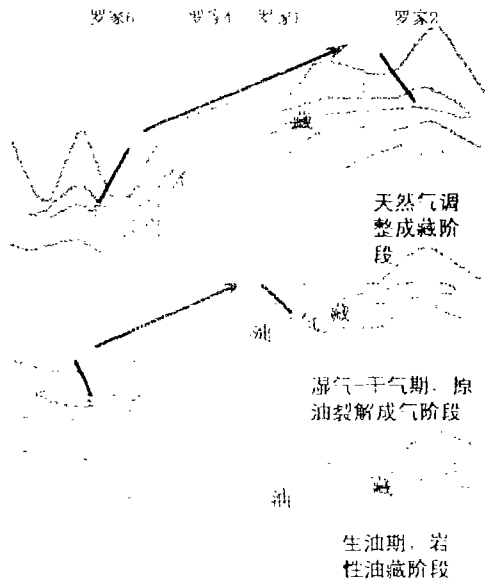


图4 罗家寨气田形成过程分析

Fig. 4 Sketch map of forming process of Luojiatai gasfield in the northeastern Sichuan Basin

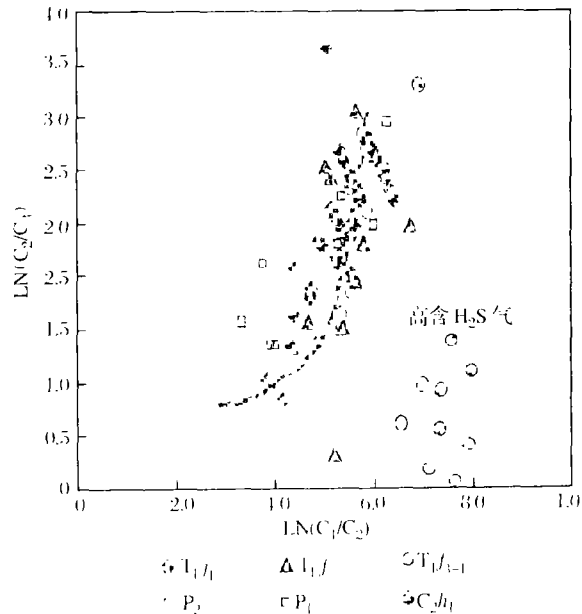


图5 川东各层系天然气 $\ln(C_1/C_2)$ 与 $\ln(C_2/C_3)$ 关系

Fig. 5 Relationship of $\ln(C_1/C_2)$ and $\ln(C_2/C_3)$ of natural gas in the eastern Sichuan Basin

塔里木盆地塔北隆起天然气也具有与四川盆地天然气相似的成藏特征。塔北古隆起形成于加里东末—早海西期,为继承性古隆起,加里东晚期—海西早期是中下

寒武统和下奥陶统烃源岩主要生油期,由于海西早期运动而破坏,海西晚期中下寒武统和下奥陶统烃源岩继续生油,至喜山期生成干气,生成的石油和天然气和中上奥陶统烃源岩生成的湿气进入圈闭形成了现今塔北隆起的天然气藏。天然气藏具有东南部桑塔木天然气偏干,甲烷含量大于90%,西北部天然气偏湿,反映天然气运移方向由东南向西北部运移^[6]。

这类天然气具有如下特征:源岩老、天然气组分干、高一过成熟、同位素相对较重、生气高峰早于圈闭定型期、多期成藏。

2.2.2 异地改造型晚期成藏气藏

异地改造型晚期成藏气藏指的是成藏定型期的圈闭与早期油气聚集场所在空间上很不相同。四川盆地川西新场气田便是如此,新场气田气源为川西三叠系须家河组气源岩,为煤系气源岩,在燕山期进入生气高峰,此时,新场圈闭已形成,古气藏在喜山期经前规模越来越大,由于喜山运动强烈,新场地区须家河组源岩及之上的侏罗系储层产生裂缝系统,古气藏再运移形成了新场气田^[2]。由于天然气是从下部通过断层和裂缝运移聚集,上下部天然气地球化学特征表现出微弱的不同,上部天然气甲烷碳同位素值(-33.62‰和-23.06‰)略轻于下部天然气甲烷碳同位素值(-32.60‰和-22.90‰)。但从天然气组分和碳同位素值来看,均相差不大。均表现出组分干,干燥系数0.95以上,碳同位素较重。

2.3 生气期晚的改造型晚期成藏气藏(新生古储型)

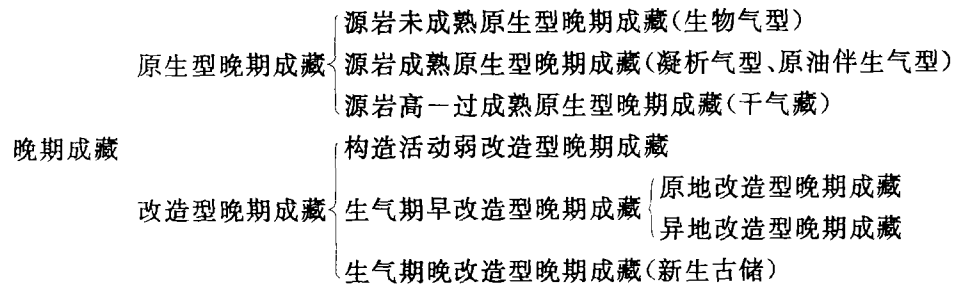
在中国中、新生代盆地,存在这样一种类型天然气,天然气的圈闭类型大都是古潜山圈闭,大部分为新生古储型天然气,圈闭最初形成期早于源岩生油气高峰,但圈闭最终定型期却晚于生气高峰。这种配置关系导致烃源岩多期生成的油气均能进入圈闭,多源多期生成的油气在圈闭中重新分配成藏。如渤海湾盆地千米桥奥陶系潜山凝析气藏的成藏便是如此,古潜山形成期为印支—燕山期,第三系沙三段为天然气主要气源岩,生油高峰期 of 下第三系东营组,生气高峰期为上第三系明化镇组。多期生成的油气运移进入古潜山圈闭聚集成藏。千米桥潜山、兴隆台、锦州20-2等气田均属于此类。这种类型天然气组分差异较大,若圈闭主要捕获气源岩后期生成的天然气,表现为天然气组分较干,碳同位素较重;反之,则天然气组分较湿,碳同位素也较轻。但总体来看,中国的改造型晚期成藏的气藏具有碳同位素较重的特征。

3 结论

(1) 晚期成藏是中国天然气藏的主要成藏特征。

(2) 晚期成藏的天然气分为原生型晚期成藏和改造型晚期成藏两大类,原生型生物气型等六小类。

(3) 不同类型的晚期成藏的气藏由于源岩及源岩



演化程度的差异及与圈闭匹配关系不同而表现出不同的地化特征。原生型晚期成藏的天然气依据源岩类型及演化程度形成不同类型的气藏如生物气、石油伴生气、凝析气藏及高一过熟煤成气等,天然气组成及碳同位素值变化较大,但改造型晚期成藏的天然气大多具有碳同位素较重的特征。

参考文献(References)

1 MacGregor D S, Factors controlling the destruction or preservation of giant light oil fields. *Petroleum Geoscience*, 1996, (2):197~227

2 戴金星,王庭斌,宋岩,等.中国大中型气田形成条件与分布规律.北京:地质出版社,1997

3 郝石生,黄志龙,杨家崎.天然气运聚平衡及其应用.北京:石油工业出版社,1994

4 龚再升,王国纯.渤海湾新构造运动控制晚期油气成藏.石油学报,2001,22(2):1~7

5 董伟良,黄保家.莺—琼盆地煤成气的识别标志及勘探潜力.煤成烃国际学术研讨会论文集.北京:石油工业出版社,2000

6 周兴熙.塔里木盆地天然气形成条件及分布规律.北京:石油工业出版社,1998

Characteristics of Organic Geochemistry of Natural Gas Accumulated in Late Stage in China

LI Jian LUO Xia LIU Ren-he Hu Guo-yi XIE Zeng-ye

(Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Langfang, Hebei 065007)

Abstract Research on natural gas formation and characteristics of organic geochemistry of gas fields in China illustrates that natural gases in China are nearly formation in late stage. Late stage formation and its type are defined in this article according to the characteristics of depressional basins in China. Characteristics of organic geochemistry of all types of primary and modified late stage gas fields are also summarized in this paper.

Key words natural gas, late hydrocarbon, accumulation, characteristic of organic geochemistry