

文章编号:1000-0550(2004)04-0683-06

成藏过程对天然气地球化学特征的控制作用

赵孟军¹ 潘文庆² 张水昌¹ 韩剑发²

1(中国石油勘探开发研究院 北京 100083)2(中国石油塔里木油田分公司 新疆库尔勒 841000)

摘要 克拉2和阿克1天然气都具有组分明显偏干、碳同位素明显偏重的特征,如克拉2和阿克1天然气的干燥系数都接近于1.0,克拉2天然气的 $^{13}C_1$ 为-27.3‰~-31.1‰,阿克1天然气的 $^{13}C_1$ 为-21.9‰~-25.2‰,从“源控”的角度似乎这些天然气应该属于过成熟煤成气,这样计算所得到的天然气成熟度远大于实测和模拟计算的源岩成熟度。因此在解释克拉2和阿克1天然气数据的时候,除了“源控”的因素外,更应强调成藏过程的影响。分析认为晚期阶段聚气是造成克拉2和阿克1天然气都具有组分明显偏干、碳同位素明显偏重的主要因素。

关键词 天然气地球化学 成藏过程 晚期聚气 克拉2气田 阿克1天然气

第一作者简介 赵孟军 男 1965年出生 博士 高级工程师 石油、天然气地质

中图分类号 P593 **文献标识码** A

西方学者认为生成过程中的分馏是控制烃类气体组成的主要因素^[1,2],但是另一些学者则详述了后生分馏作用的重要性,强调扩散过程中的分馏作用^[3,4,5]。我国学者在天然气成因及源岩类型方面深入研究了天然气组分和碳同位素的变化^[6,7],从而深入探讨了天然气来源、成因及混源问题^[8,9]。其中徐永昌等已经注意到了成藏过程的因素,他认为连续沉降的盆地与沉积—抬升—沉降的盆地具有不同的 R_o 和 $^{13}C_1$ 的对应关系^[7],但在某些地区则表现出了十分明显的成藏过程对天然气组分和碳同位素的巨大影响^[10~12]。这里我们通过库车坳陷克拉2气田和喀什凹陷阿克莫木气田为例来说明成藏过程对天然气地球化学特征的影响。

1 地质概况

克拉2气田位于塔里木盆地库车坳陷直线背斜带西段,南为拜城凹陷,北为北部单斜带(图1)。克拉2气田发现奠定了塔里木盆地作为我国“西气东输”的重要天然气基地的资源基础。库车坳陷主要分布中—上三叠统浅湖—半深湖相泥质烃源岩和中—下侏罗统煤系烃源岩,具有厚度大、丰度高、类型差和成熟度高的特点^[13]。综合分析认为库车油气系统天然气主要源自三叠、侏罗系烃源岩,且侏罗系烃源岩的贡献大于三叠系^[14]。

塔里木盆地喀什凹陷的阿克1并于2001年7月

获高产工业气流,日产天然气 $13 \times 10^4 m^3$,从而发现了阿克莫木气田。该气田位于塔西南坳陷西部喀什凹陷北缘的阿克莫木背斜(图1)。喀什凹陷主要发育石炭系和侏罗系两套源岩,根据各套烃源岩生烃史、生烃量以及天然气组分和碳同位素特征,阿克1井天然气主要源自石炭系烃源岩^[15]。

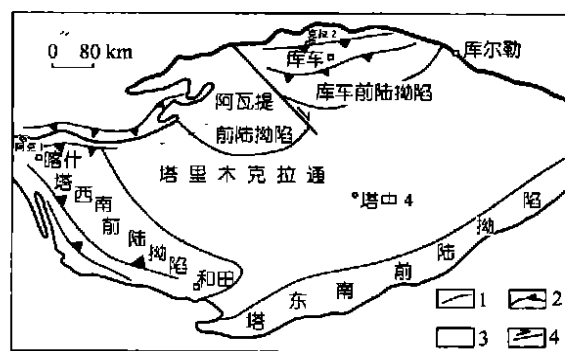


图1 塔里木盆地构造格局及气田位置

1. 盆地边界;2. 冲断带;3. 前陆盆地;4. 断裂

Fig.1 Structural framework and gas fields in Tarim basin

2 天然气地球化学特征

2.1 克拉2

克拉2气田天然气组成以烃类气体为主(表1),非烃气体含量极低, CO_2 含量0~1.24%, N_2 含量也只有0.6%~2.84%;烃类气体中以甲烷为主,甲烷含量为96.9%~98.22%,乙烷含量很低,为0.31%~

0.53%,几乎不含大于乙烷的烃类组分,因此天然气干燥系数几乎接近1.0。与库车坳陷的依奇克里克构造带和前缘隆起带主要天然气藏的天然气相比,克拉2气田的天然气组分明显偏干^[14]。库车坳陷的依奇克里克构造带和前缘隆起带主要天然气藏的天然气都表现为湿气特征^[14],如塔北隆起北缘的玉东2、羊塔克、英买7、牙哈、提尔根等为凝析气藏,C₁含量66%~92.38%,均值为71.8%~88.31%,C₂₊含量为1.33%~26.18%,均值为6.78%~17.25%。

库车坳陷除克拉苏构造带以外的其它凝析气藏天然气的¹³C₁值一般为-33‰~-39‰,¹³C₂值一般为-22‰~-25‰,表征了典型的腐殖型天然气的特征。而克拉2气田天然气¹³C₁和¹³C₂值明显偏重,¹³C₁为-27.3‰~-31.1‰,¹³C₂为-16.8‰~-19.4‰(表2),¹³C₂与¹³C₁差值较大为7.9~14.3。

2.2 阿克莫木

天然气组分分析表明阿克1井天然气为非烃组分含量较高的干气,其中烃类气体含量为80.41%~90.79%,在烃类气体中甲烷为主要成分,重烃气不超过0.3%,干燥系数高达99.7%。阿克1井非烃气体

含量较高,其中N₂含量最高可达9.04%,CO₂含量最高可达11.39%(表1)。

同样阿克1井天然气¹³C₁和¹³C₂值明显偏重,¹³C₁为-21.9‰~-25.2‰,¹³C₂为-20.2‰~-21.2‰(表2),¹³C₂与¹³C₁差值较小为2.8~4.1,说明与克拉2天然气在成因上有差别。

3 问题提出和讨论

天然气的甲烷及同系物碳同位素值主要受母质类型和成熟度双重因素的控制^[7,16]。徐永昌和戴金星等对我国大中型煤成气田的统计结果都表明^[7,16],我国煤成气¹³C₁值主要分布区间为-32‰~-38‰,¹³C₂值主要分布在-22‰~-28‰,而克拉2天然气的¹³C₁值和¹³C₂值明显偏重,二者平均值分别为-27.36‰和-18.50‰,因此克拉2天然气被认为是过成熟阶段的煤成气^[17];同样阿克1天然气的¹³C₁值和¹³C₂平均值分别为-24.3‰和-20.8‰,似乎该天然气也应该属于典型的过成熟煤成气,尽管如此偏重的碳同位素值在国内外一些过成熟的煤成气中极为少见。

表1 克拉2及阿克莫木气田天然气组分(%)特征

Table 1 Natural gas compositions(%) of Kela 2 and Akemomu gas fields

井号	深度/m	层位	C ₁	C ₂	C ₃	iC ₄	nC ₄	iC ₅	nC ₅	CO ₂	N ₂	C ₂₊	C ₁ /C ₁₋₅
KL2	3499.87~3534.6	E	96.9	0.309						1.238	1.552	0.309	0.997
KL2	3499.87~3534.6	E	98.05	0.4						0.94	0.6	0.4	0.996
KL2	3888~3895	K	98.22	0.53	0.04	0.01	0.01	0.01		0.55	0.6	0.6	0.994
KL2	3803~3809	K	98.08	0.42	0.04	0.01	0.01			0.74	0.56	0.48	0.995
AK1	3234~3341		80.4	10.19	0.02					10.34	9.04	0.21	0.997
AK1	3325~3345		80.52	0.23	0.02					11.39	7.82	0.25	0.997
AK1	3371~3376		90.79	0.21	0.02					0.08	8.9	0.23	0.998

表2 塔里木盆地克拉2和阿克莫木气田天然气组分碳同位素特征

Table 2 Carbon isotopes of natural gas composition of Kela 2 and Akemomu gas fields

气田	井号	层位	井段 /m	¹³ C _{CO₂}	¹³ C ₁	¹³ C ₂	¹³ C ₃	¹³ C ₄
				/‰	/‰	/‰	/‰	/‰
克拉2	克拉201	K ₁ b	3936~3938	-15.83	-26.16	-18.09	-19.06	-22.14
	克拉201	K ₂ b	3770~3795	-22.57	-27.19	-17.87	-19.14	-20.55
	克拉201	K ₂ b	4016~4021	-18.58	-27.32	-19.00	-19.54	-20.90
	克拉202	E	1472~1481	-15.37	-28.24	-18.86	-19.15	-20.91
	克拉2	K	3888~3895	n. d.	-27.8	-19	n. d.	n. d.
	克拉2	E	3498.87~3534.66	n. d.	-27.3	-19.4	n. d.	n. d.
阿克莫木	阿克1	K ₂	3234~3341	-11.18	-24.7	-21.2	-20.1	-20.7
	阿克1	K ₂	3325~3345	-8.6	-25.2	-21.1		
	阿克1	K ₂	3371~3376	-4.6	-23	-20.2		

若根据天然气的干燥系数和甲烷碳同位素来判断,克拉2和阿克1天然气都为成熟度很高的过成熟度天然气,如采用戴金星公式^[18]计算所得到的克拉2天然气的成熟度为2.93%~3.85%,阿克1天然气为4.86%~6.41%。但这与根据露头剖面实测的烃源岩的 R_0 值以及根据埋藏史、热史所确定的烃源岩的 R_0 值不符合,克拉2天然气源自库车坳陷的三叠~侏罗系烃源岩,但是现今侏罗系烃源岩的成熟度应该为1.2%~2.3%,三叠系烃源岩的成熟度为1.8%~2.6%^[13];阿克1井天然气主要源自石炭系烃源岩,但是现今模拟计算的石炭系烃源岩的成熟度为2.0%~3.5%,如果烃源岩的 R_0 大于4.0%,那么其生成的天然气的潜力就值得怀疑了。很明显计算出的天然气成熟度远大于实际烃源岩的成熟度。

因此要解释这样的矛盾,不能只从“源”的因素去考虑,还要考虑天然气的成藏过程。克拉2和阿克1天然气主要聚集了较高成熟度阶段的产物,由于早期生成的碳同位素较轻的天然气的散失,从而造成了晚期阶段聚集的天然气碳同位素明显偏重。图2说明部分天然气损失时对圈闭中天然气甲烷碳同位素的影响,图中虚线表示天然气分别损失65%、45%、25%后的天然气甲烷碳同位素的变化趋势线,气体损失量越大,甲烷的碳同位素越重^[19]。

表3是一湖相源岩在压力体系下边生边排收集到的气态烃碳同位素演化特征,随着演化程度的增高,气态烃碳同位素分馏非常明显,450~500温阶

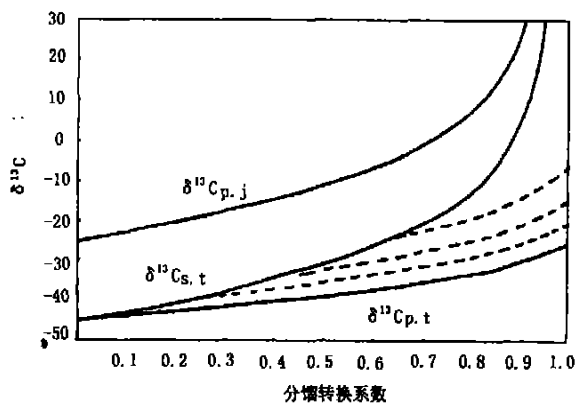


图2 累积与部分聚集的天然气甲烷碳同位素值变化图^[19]
注: $\delta^{13}C_{s,t}$ 表示残余的生成甲烷的基团的 ^{13}C 曲线, $\delta^{13}C_{p,i}$ 表示瞬时生成的甲烷碳同位素曲线, $\delta^{13}C_{p,i}$ 表示瞬时生成的甲烷碳同位素曲线,虚线表示天然气分别损失65%、45%、25%之后的甲烷碳同位素曲线

Fig. 2 Variation of methane carbon isotopic values from the accumulated and partly gathered natural gas

甲烷碳同位素已达-25.77‰。尽管克拉2天然气与阿克1天然气的母源存在差异,但该模拟实验的结果从一个侧面说明了克拉2天然气和阿克1天然气都具有阶段聚集的特征,即主要聚集了源岩高演化阶段的产物。

表3 压力体系下边生边排天然气碳同位素(孙永革等,2000)

Table 3 Carbon isotopes of natural gas released from the ongoing generation under pressure system (after Sun Yongge et al., 2000)

温阶	$^{13}C_1$ / ‰	$^{13}C_2$ / ‰	$^{13}C_3$ / ‰	演化阶段 R_0 / %
350~400	-47.08	-40.07	-36.02	0.8~1.0
400~450	-31.09	-26.25	-26.93	1.0~1.5
450~500	-25.77	-22.22	-24.62	1.5~2.0

4 成藏过程及对天然气地化特征的影响

4.1 克拉2气藏

在油气源对比和储层地球化学研究的基础上^[20],结合源岩生烃史和构造发育史,可将克拉2气田的成藏概括为两次充注、两次调整(破坏)的形成过程(图3)^[12]。喜山早期,即下第三系沉积末期,克拉苏附近的三叠系烃源岩成熟度已经较高, R_0 约为1.3%,而侏罗系烃源岩成熟度较低, R_0 约为0.9%。该期聚集的油气主要分布在白垩系和下第三系中,后由于喜山早期运动的影响,断层发生开启,地表水渗入,而受到降解破坏。

随着上覆地层的不断沉积,埋深不断加大,三叠系烃源岩在 R_0 为1.3%之后生成的天然气和侏罗系烃源岩在 R_0 为0.9%以后生成的油气开始聚集。天然气则主要是捕获的晚期阶段生成的产物,从而使其组分偏干、碳同位素偏重。由于 N_2k 末时喜山末期构造运动强烈,克拉2构造圈闭抬升,聚集在白垩系背斜中的油气发生再转移,并调整到现今克拉2号气藏中。

正是由于克拉2主要聚集了三叠系在 R_0 为1.3%之后生成的甲烷碳同位素重于-32.8‰的天然气和侏罗系在 R_0 为0.9%之后生成的甲烷碳同位素重于-35.0‰的天然气的组合,才使现今的克拉天然气的组分明显偏干、碳同位素明显偏重。因此克拉2天然气

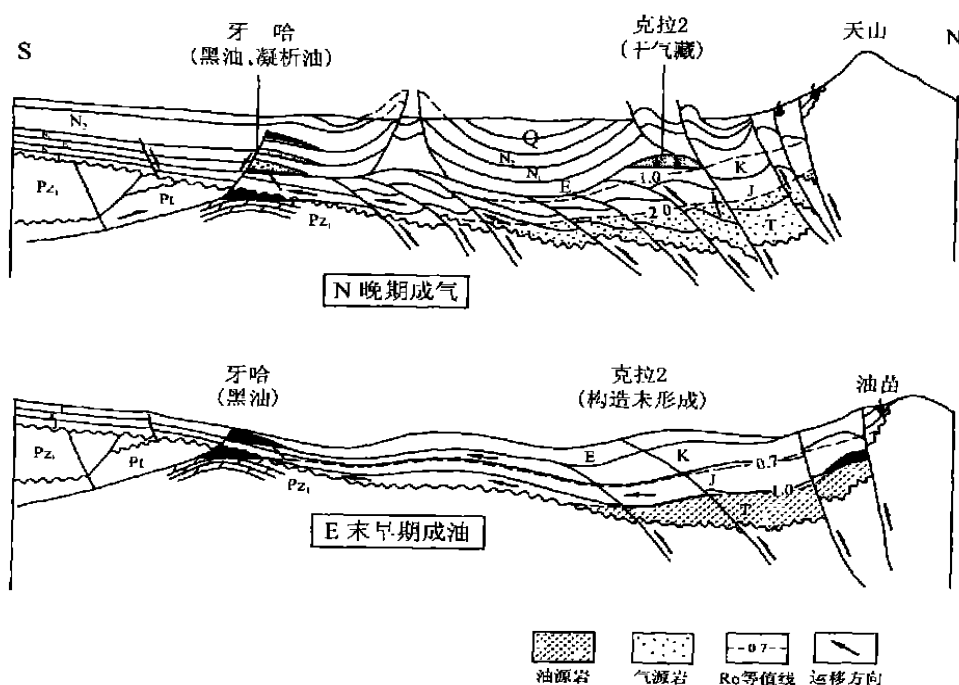


图3 库车坳陷天然气两期成藏过程

Fig. 3 Schematic map showing the twice periods of gas pool forming process

的“晚期聚气”主要是聚集的高成熟阶段的天然气。另外,从天然气中 N_2 含量很低(表1)这一事实可以判定,天然气烃源岩的成熟度不会很高,因为在泥质烃源岩和煤系地层中, N_2 的含量随成熟度的增加而增加,表现在 N_2 的含量随天然气中甲烷碳同素值的增加而增加。

4.2 阿克莫木气藏

同样,研究认为阿克莫木也经历了多期次的成藏过程。在喀什凹陷第三系沉积之前,石炭系烃源岩就已经进入了高成熟阶段,其 R_o 主要为1.5%~1.8%。第三系沉积后,尤其是上第三系的巨厚沉积,石炭系烃源岩进入了过成熟阶段。此时阿克莫木天然气聚集成藏,但很明显阿克莫木主要聚集了石炭系烃源岩在 R_o 为1.5%~1.8%之后生成的甲烷碳同素重于-30.8‰~-31.9‰的天然气,从而造成了晚期聚集的阿克莫木天然气组分很“干”,碳同素很重。从天然气中 N_2 含量(表1)较高的事实也证实了该天然气的成熟度较高,也说明阿克莫木天然气的“晚期聚气”主要是聚集的过成熟阶段的天然气,至于较高的 CO_2 含量则与石炭系灰质泥岩的源岩性质及所经历的高温阶段有关^[15]。

5 结论

(1) 克拉2和阿克1天然气都具有组分明显偏干、碳同素明显偏重的特征,如克拉2和阿克1天然气的干燥系数都接近于1.0,克拉2天然气的 $^{13}C_1$ 为-27.3‰~-31.1‰,阿克1天然气的 $^{13}C_1$ 为-21.9‰~-25.2‰。

(2) 根据克拉2和阿克1天然气组分碳同素特征认为这些天然气应该属于过成熟煤成气,这样计算所得到的天然气成熟度远大于实测和模拟计算的源岩成熟度。因此成藏过程是造成克拉2和阿克1天然气都具有组分明显偏干、碳同素明显偏重的主要因素。

(3) 克拉2天然气的“晚期聚气”主要是聚集的高成熟阶段的天然气,即聚集了三叠系在 R_o 为1.3%之后的天然气和侏罗系在 R_o 为0.9%之后生成的天然气;阿克莫木天然气的“晚期聚气”主要是聚集的过成熟阶段的天然气,即聚集了石炭系烃源岩在 R_o 为1.5%~1.8%之后生成的天然气。

参考文献(References)

- 1 Clayton C. Carbon isotope fractionation during natural gas generation from

- kerogen. *Marine and Petroleum Geology*, 1987, 8: 232 ~ 240
- 2 Cramer B, Krooss B M and Littke R. Modelling isotope fractionation during primary cracking of natural gas: a reaction kinetic approach. *Chemical Geology*, 1998, 149: 235 ~ 250
 - 3 Bondar A D. Role of diffusion in differentiation of carbon isotopes of methane of the Earth's crust (in Russian). *Geokhimiya*, 126(3-4): 233 ~ 246
 - 4 Krooss B M, Leythausen D, Schaefer R G G. The quantification of diffusive hydrocarbon losses through cap rocks of natural gas reservoirs - a reevaluation. *AAPG Bulletin*, 1992, 76: 403 ~ 406
 - 5 Krooss B M, Schlomer S, Schaefer R G G, and Littke R. Aspects of natural gas generation and migration in sedimentary systems. V. M. Goldschmidt conference 1998. *Mineralogical Magazine*, 1998, 62: 818-819
 - 6 戴金星,裴锡古,戚厚发. 中国天然气地质学. 北京:石油工业出版社, 1992. 10 ~ 15 [Dai Jinxing, Pei Xigu and Qi Houfa. *Natural gas geology in China*. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992. 10 ~ 15]
 - 7 徐永昌. 天然气成因理论及应用. 北京:科学出版社, 1994. 84 ~ 102. [Xu Yongchang. *The Theory of Natural Gas Generating and It's Application*. Beijing: Science Press, 1994. 84 ~ 102]
 - 8 付锁堂,冯乔,张文正. 鄂尔多斯盆地苏里格庙与靖边天然气单体碳同位素特征及其成因. *沉积学报*, 2003, 21(3): 528 ~ 532 [Fu Suotang, Feng Qiao, Zhang Wenzheng. Characteristics of the individual carbon isotope of natural gas from Suligemiao and Jingbian gas fields in Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(3): 528 ~ 532.]
 - 9 夏新宇,赵林,戴金星,等. 鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系风化壳气藏天然气来源及混源比计算. *沉积学报*, 1998, 16(3): 75 ~ 78 [Xia Xinyu, Zhao Lin, Dai Jinxing, et al. Gas sources and mixing ratio of Ordovician weathering crust reservoir of central gas field in Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(3): 75 ~ 78]
 - 10 张同伟,王先彬,陈践发,王雅丽. 天然气运移的气体组分的地球化学示踪. *沉积学报*, 1999, 17(4): 627 ~ 632 [Zhang Tongwei, Wang Xianbin, Chen Jianfa, Wang Yali. Chemical composition of gases as a geochemical tracer of natural gas migration. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(4): 627 ~ 632]
 - 11 Wang Zhaoming, Wang Tingdong, Xiao Zhongyao, Xu Zhiming, Li Mei and Lin Feng. Migration and accumulation of natural gas in Kela-2 gas field. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47, ZX, BP, DY: 107 ~ 112
 - 12 Zhao Mengjun, Lu Shuangfang, Wang Tingdong & Li Jian. Geochemical characteristics and formation process of natural gas in Kela 2 gas field. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47, ZX, BP, DY: 113 ~ 119
 - 13 赵孟军,卢双舫,李剑. 库车油气系统天然气地球化学特征及气源探讨. *石油勘探与开发*, 2002, 48(6): 4 ~ 7 [Zhao Mengjun, Lu Shuangfang and Li Jian. The geochemical features of natural gas in Kuqa depression and the discussion on the gas source. *Petroleum Exploration & Development*, 2002, 48(6): 4 ~ 7]
 - 14 赵孟军,张宝民. 库车前陆拗陷形成大气区的烃源岩条件. *地质科学*, 2002, 37(增刊): 35 ~ 44 [Zhao Mengjun & Zhang Baomin. Source rocks for a giant gas accumulating area in the Kuqa foreland depression. *Chinese Journal of Geology*, 2002, 37(Suppl.): 35 ~ 44]
 - 15 赵孟军,夏新宇,秦胜飞,等. 塔里木盆地阿克1井气藏气源研究. *天然气工业*, 2003, 23(2): 31 ~ 33 [Zhao Mengjun, Xia Xinyu, Qin Shengfei, et al. Gas sources study of Ake Well 1 resource in Tarim Basin. *Natural Gas Industry*, 2003, 23(2): 31 ~ 33.]
 - 16 戴金星,钟宁宁,刘德汉,等. 中国煤成大中型气田地质基础和主控因素. 北京:地质出版社, 2000. 11 ~ 23 [Dai Jinxing, Zhong Ningning, Liu Dehan, et al. *The Geological Base and Main Controlling Factors on the Large and Medium Coal Formed Gas Field*. Beijing: Geological Publishing House, 2000. 11 ~ 23]
 - 17 贾承造,秦胜飞,李启明. 塔里木盆地库车坳陷油气的形成与分布. 见:戴金星,傅诚德,夏新宇主编. 煤成烃国际学术研讨会论文集. 北京:石油工业出版社, 2000. 176 ~ 190 [Jia Chengzao, Qin Shengfei and Li Qiming. Petroleum formation and occurrence in Kuche Depression of Tarim Basin. In: Dai Jinxing, Chengde and Xia Xinyu, eds. *International Symposium on Hydrocarbon from Coal*. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000. 176 ~ 190]
 - 18 戴金星,戚厚发. 我国煤成气的 $^{13}\text{C}_1 - R_o$ 关系. *科学通报*, 1989, 34(9): 265 ~ 269 [Dai Jinxing and Qi Houfa. The relationship of $^{13}\text{C}_1 - R_o$ of coal formed gas in China. *Chinese Science Bulletin*, 1989, 34(9): 265 ~ 269]
 - 19 Rooney M A, Cloypool G E, Chung H M. Modeling thermogenic gas generation using carbon isotope ratios of natural gas hydrocarbons. *Chemical Geology*, 1995, 126: 219 ~ 232
 - 20 李慧莉,邱楠生,金之钧,吕修祥. 塔里木盆地克拉2气田储层流体包裹体与油气成藏研究. *沉积学报*, 2003, 21(4): 648 ~ 653 [Li Huli, Qiu Nansheng, Jin Zhijun, Lu Xuxiang. Study on hydrocarbon entrapment in Kela 2 gas field, Tarim Basin—Evidence from reservoir fluid inclusion. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(4): 648 ~ 653]

The Effect on the Geochemical Characteristics of Natural Gas by Filling Process

ZHAO Meng-jun¹ PANG Wen-qing² ZHANG Shui-chang¹ HAN Jian-fa²

1(Research Institute of Petroleum Exploration and Development of PetroChina, Beijing 100083)

2(Talimu Oil Company of PetroChina, Korle, Xinjiang 841000)

Abstract The natural gases of Kela-2 and Ake-1 are similarly very "dry" in component and more "heavier" in carbon isotopes, such as dry coefficient (bulk ratio of methane to total hydrocarbons) of Kela-2 gas and Ake-1 gas near 1.0, ¹³C₁ value (methane carbon isotopic ratio) from -27.3‰ to -31.1‰ for Kela-2 gas and from -21.9‰ to -25.2‰ for Ake-1 gas. According to the data by traditional interpretation, the gases could be derived from source rock with over maturity. But, the maturity of the gases through calculation were much higher than the maturity of source rocks by determined or by basin analysis. So, when data of Kela-2 gas and Ake-1 gas are explained, the effect on the gases by filling process must be emphasized. In this paper, it is stated the main cause that the Kela-2 gas and Ake-1 gas tend to be dry and bear heavier isotope composition lies in the filling process with gas partial accumulation in late period.

Key words gas geochemistry, filling process, accumulation in late period, Kela-2 gas and Ake-1 gas