

# 准噶尔盆地南缘异常天然气地球化学特征及其成因

宋占东<sup>1,2,3</sup>, 姜振学<sup>1,2</sup>, 张梦瑜<sup>4</sup>

(1. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京) 盆地与油藏研究中心, 北京 102249; 3. 阿派斯油藏技术(北京)有限公司, 北京 100015; 4. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249)

**摘要:** 利用天然气成因判别 Whiticar 图版研究准噶尔盆地南缘独87井、南安1井和齐34井天然气成因类型, 结论与乙烷和丙烷碳同位素判别结果相矛盾。在分析研究区南安1井八道湾组、齐34井中、下侏罗统和独87井中新统储层天然气组分和碳同位素组成特征的基础上, 对异常天然气成因进行分析。南安1井甲烷含量为84.58%, 齐34井甲烷含量为97.38%, 两者均为干气; 独87井甲烷含量仅为77.09%, 为湿气。独87井碳同位素变化比较复杂, 出现 $\delta^{13}C_1 > \delta^{13}C_2$ ,  $\delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3$  且  $\delta^{13}C_3 > \delta^{13}C_4$  局部碳同位素倒转现象; 齐34井天然气为  $\delta^{13}C_2 > \delta^{13}C_3 > \delta^{13}C_4$  的局部碳同位素倒转; 南安1井没有出现碳同位素倒转, 为正碳同位素特征。南安1井和齐34井天然气因受到细菌降解作用, 其组分含量和碳同位素发生变化; 独87井天然气 $\delta^{13}C_1$  变重是上覆盖层封盖能力较差、甲烷发生漏失所致。据此对 Whiticar 图版进行了必要的补充修正, 可以对细菌降解和甲烷漏失次生作用进行有效识别, 避免对天然气母质类型认识上的误差。

**关键词:** 天然气组分 地球化学特征 碳同位素 细菌降解 甲烷漏失 准噶尔盆地南缘

**中图分类号:** TE112.111

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9603(2014)02-0066-05

准噶尔盆地南缘天然气显示非常活跃, 不仅有较高气油比和产能的天然气藏, 地表气苗、泥火山和矿井瓦斯以及温泉气体也非常丰富, 表明准噶尔盆地南缘具有良好的天然气勘探前景<sup>[1]</sup>。准噶尔盆地南缘以煤型气为主, 仅在四棵树凹陷四参1井发现少量油型气, 卡6井、独58井和安气1井发现油型气和煤型气的混合气<sup>[2]</sup>。应用天然气成因判别 Whiticar 图版<sup>[3]</sup>研究其成因类型时发现, 大部分气样数据点落到Ⅲ型干酪根和煤生成的天然气区域, 与乙烷和丙烷碳同位素判别结果一致; 但部分天然气数据落到该区域之外, 如南安1井和齐34井天然气

数据分布在该区域上方, 具有Ⅱ型干酪根生成天然气特征, 与乙烷和丙烷碳同位素判别结果矛盾, 而独87井天然气数据偏移到该区域下方。笔者在分析准噶尔盆地南缘异常天然气地球化学特征的基础上, 对其成因进行分析, 以期对其他地区天然气成因研究提供一定的借鉴。

## 1 地质背景

准噶尔盆地南缘为北天山山前一长条形、北西西向的山前褶皱带(图1), 从南向北依次发育山前

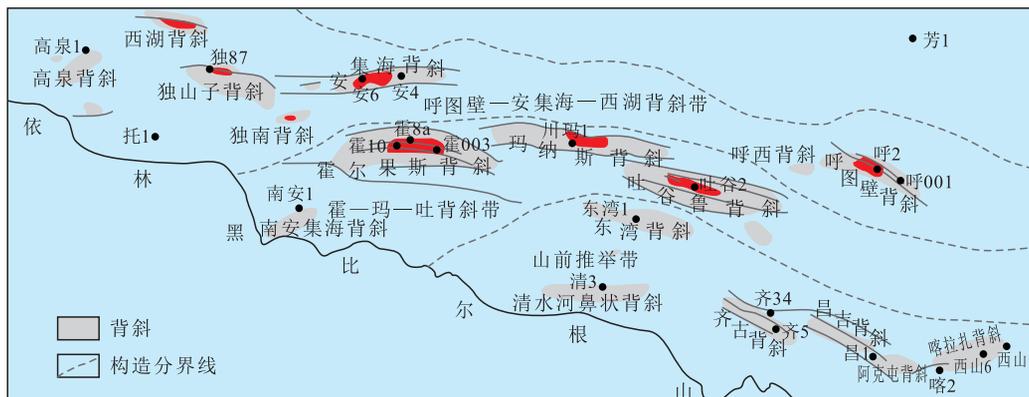


图1 准噶尔盆地南缘区域构造

收稿日期: 2013-12-17。

作者简介: 宋占东, 男, 博士, 从事油气成藏机理与分布规律研究。联系电话: 15910595686, E-mail: songfy01@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目“叠合盆地油气藏深埋过程中油气组分和相态演化机制”(40972088), 国家科技重大专项“典型前陆盆地致密储层天然气藏形成机理与成藏模式”(2011ZX05003-001)。

推举带、霍—玛—吐背斜带和呼图壁—安集海—西湖背斜带<sup>[4]</sup>。前人研究成果表明,研究区原油主要来自中、下侏罗统煤层和二叠系暗色泥页岩,而天然气主要源自侏罗系煤系地层<sup>[5]</sup>。中、下侏罗统煤系地层主要生气期为燕山运动期,以白垩纪为主,喜马拉雅运动期干酪根达到晚期热降解和原油裂解阶段<sup>[6]</sup>。异常天然气分别来自山前推举带的齐古背斜、霍—玛—吐背斜带靠近山前的南安集海背斜和呼图壁—安集海—西湖背斜带上的独山子背斜,即在3排背斜带上均有分布。

## 2 异常天然气组分和碳同位素组成特征

### 2.1 天然气组分

南安集海背斜南安1井产气层位为八道湾组(J<sub>1b</sub>),2套气层埋深分别为509和770 m。烃类气体组分中的甲烷含量为83.37%~85.63%,平均为84.58%(表1);重烃含量极低,平均为0.39%;非烃气体中不含二氧化碳,仅含有微量氧气,氮气含量相

表1 准噶尔盆地南缘异常天然气地化参数

井号	层位	埋深/m	$\delta^{13}\text{C}$ , ‰				组分含量, %					$\text{C}_1/\text{C}_{1-5}$
			$\text{C}_1$	$\text{C}_2$	$\text{C}_3$	$\text{C}_4$	$\text{C}_1$	$\text{C}_2$	$\text{C}_3$	$\text{C}_4$	非烃	
独87	N <sub>1</sub>	553~1 148	-25.59	-25.84	-23.59	-24.07	77.09	12.93	5.99	2.67	1.33	0.78
齐34	J <sub>1-2</sub>	880~920	-41.10	-23.04	-23.44	-25.84	97.38	0.87	0.09	0.00	1.66	0.99
南安1	J <sub>1b</sub>	770~786	-37.51	-23.14			85.63	0.18	0.26	0.03	13.89	0.99
	J <sub>1b</sub>	509~534	-36.42	-21.74	-17.53		83.37	0.18	0.12	0.00	16.29	1.00

差,为13.85%~16.29%,平均为15.07%。与霍—玛—吐背斜带天然气相比,氮气含量较高,二氧化碳和氧气含量低。 $\text{C}_1/\text{C}_{1-5}$ 值均大于等于0.99,为干气。上、下2套储层深度相差近300 m,气体组分含量相差不大,表明南安集海背斜上、下储层连通性比较好,天然气混合比较均匀。

齐古背斜齐34井中一下侏罗统(J<sub>1-2</sub>)储层埋深为880~920 m,烃类气体以甲烷为主,含量为97.38%,重烃和非烃含量不足3%, $\text{C}_1/\text{C}_{1-5}$ 值为0.99,为干气;独山子背斜独87井异常天然气来自新近系中新统(N<sub>1</sub>),储层埋深为553~1 148 m,甲烷含量相对较少,仅为77.09%,重烃含量相对较多,为21.59%,非烃含量很低,为1.33%, $\text{C}_1/\text{C}_{1-5}$ 值为0.78,为湿气。

### 2.2 碳同位素组成特征

甲烷组分来源多样,易受到次生作用的影响,如运移分馏、细菌降解以及扩散分馏等,因此天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值变化较大<sup>[7]</sup>。重烃组分来源相对单一,受同位素分馏效应和成熟度影响较弱,与母质碳同位素组成最接近,常用来推断天然气母质类型<sup>[8-9]</sup>。通常认为, $\delta^{13}\text{C}_1 < -55\text{‰}$ 为生物成因气,而 $\delta^{13}\text{C}_1 > -55\text{‰}$ 为热成因气<sup>[9]</sup>;  $\delta^{13}\text{C}_2 > -27.5\text{‰}$ 且 $\delta^{13}\text{C}_3 > -25.5\text{‰}$ 为煤型气, $\delta^{13}\text{C}_2 < -29\text{‰}$ 且 $\delta^{13}\text{C}_3 < -27\text{‰}$ 为油型气,介于两者之间为混合气<sup>[10]</sup>。研究区异常天然气的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值为-41.10‰~-25.59‰,平均为-35.16‰;  $\delta^{13}\text{C}_2$ 值为-25.84‰~-21.74‰,平均为-23.44‰;  $\delta^{13}\text{C}_3$ 值为

-23.59‰~-17.53‰,平均为-21.52‰;  $\delta^{13}\text{C}_4$ 值为-25.84‰~-24.07‰,平均为-24.95‰(表1)。由此可知,独87井、齐34井和南安1井异常天然气的 $\delta^{13}\text{C}_1 > -55\text{‰}$ ,属于热成因, $\delta^{13}\text{C}_2$ 和 $\delta^{13}\text{C}_3$ 大于煤型气界限值,为较典型的煤型气。由此可知,准噶尔盆地南缘异常天然气是有机质热成因作用生成的煤型气。结合组分分析,确定齐34井和南安1井异常天然气为煤型干气,而独87井异常天然气为煤型湿气。

齐34井和南安1井 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值相差不大,独87井 $\delta^{13}\text{C}_1$ 明显变重,甚至略大于 $\delta^{13}\text{C}_2$ ;南安1井509~534 m井段天然气的 $\delta^{13}\text{C}_2$ 和 $\delta^{13}\text{C}_3$ 重于齐34井和独87井。独87井碳同位素变化比较复杂,出现 $\delta^{13}\text{C}_1 > \delta^{13}\text{C}_2$ ,  $\delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3$ 且 $\delta^{13}\text{C}_3 > \delta^{13}\text{C}_4$ 局部碳同位素倒转现象;齐34井天然气为 $\delta^{13}\text{C}_2 > \delta^{13}\text{C}_3 > \delta^{13}\text{C}_4$ 的局部碳同位素倒转;南安1井没有出现碳同位素倒转,为正碳同位素特征。

## 3 异常天然气成因分析

通常来讲,受热力学分馏效应控制的正常热成因天然气,随着天然气组分分子碳数变大,碳同位素组成依次变重,组分含量逐渐变小<sup>[11]</sup>。独87井和齐34井出现局部碳同位素倒转,南安1井虽然没有出现碳同位素倒转,但770~786 m井段天然气中丙烷含量为0.26%,大于乙烷含量(0.18%)。从碳同位

素组成和组分含量来看,异常天然气不符合正常天然气的热力学特征,表明异常天然气为非原生的,是受到成藏后次生作用影响的煤型气。而天然气成因判别 Whiticar 图版表明,南安1井和齐34井为 II 型干酪根生成的油型气(图2)。两者结论不同,Whiticar 图版判识结论显然不正确。

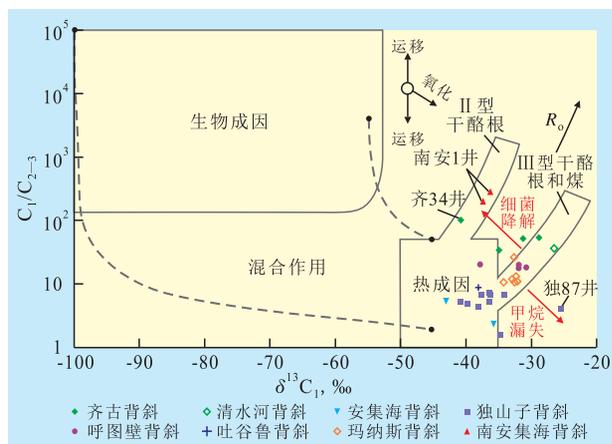


图2 准噶尔盆地南缘异常天然气成因判别 Whiticar 图版

南安1井和齐34井天然气成因判识结果主要是由  $C_1/C_{2-3}$  值增大所致,也就是说或是甲烷含量增加,或是重烃含量减少,或是两者同时按照上述规律变化,导致天然气组分  $C_1/C_{2-3}$  值增大。与同一背斜其他储层天然气相比较,这类天然气的  $\delta^{13}C_1$  组成也略微变轻。与前两者不同,独87井天然气  $C_1/C_{2-3}$  值与独山子背斜其他气井样品值相差不大,出现异常原因主要是  $\delta^{13}C_1$  组成变重。可见异常天然气的成因不同,南安1井和齐34井天然气属一种成因,而独87井天然气则为另一种成因。

导致天然气中甲烷含量增加的地质作用主要有3种:①运移分馏作用。与天然气组分中的重烃气分子相比较,甲烷具有分子直径小、密度低、不易被吸附等特点。这些特点决定了天然气在运移过程中,甲烷分子易于移动而优先运移,运移分馏过程中分馏气中的甲烷含量不断增加, $\delta^{13}C_1$  也具有变轻的趋势,重烃气含量相对减小。运移分馏是甲烷不断富集的过程,天然气组分呈现出“甲烷化”和“异构化”的趋势<sup>[12]</sup>,甚至可以在不改变天然气成熟度的条件下,使原生湿气最终变为次生干气<sup>[13]</sup>。②细菌降解作用。细菌降解作用在中外油气田中是一种普遍存在的地质现象。当天然气遭受细菌降解时,遭受降解的组分含量减小, $\delta^{13}C$  会增大  $2\% \sim 7\%$ <sup>[14]</sup>,相邻的低碳数组分含量增加,同时  $\delta^{13}C$  变轻。遭受细菌降解的天然气,随着分子碳数逐渐增大,组分含量依次递减的规律被破坏,出现遭受细

菌降解组分的  $\delta^{13}C$  变重,其组分含量相应变少的变化规律<sup>[15]</sup>。应用  $\delta^{13}C$  组成和组分含量的变化规律,即可依据碳同位素倒转与否对细菌降解成因进行分析。③重烃气的热裂解作用。成熟度较低的天然气中重烃气含量较高,而成熟度较高的天然气中重烃气含量相对较低。重烃气含量与天然气成熟度呈反向变化规律,表明重烃气具有随着分子碳数增大而热稳定性逐渐降低的特点。当地质条件达到或是超过重烃气裂解温度时,从分子碳数较大的重烃气开始裂解,其相应的组分含量随之降低,与其紧邻的低碳数组分含量则增加。

### 3.1 齐34井和南安1井

齐34井和南安1井异常天然气  $\delta^{13}C_2$  和  $\delta^{13}C_3$  值表明,这2口井的天然气是来自中、下侏罗统煤系烃源岩生成的煤型气,而储层分别为  $J_{1-2}$  和  $J_{1b}$ ,应该为源、储一体的原生天然气藏,或者运移的距离不会太远,由此可以推断运移分馏作用不是影响这类天然气组分含量和碳同位素的主要次生作用。这类气藏的产气储层最大埋深为920 m(齐34井),依据准噶尔盆地南缘现今地层温度和埋深关系计算,920 m 地层最高温度为  $38.9\text{ }^\circ\text{C}$ ,没有达到原油裂解温度下限( $185\sim 204\text{ }^\circ\text{C}$ )<sup>[16]</sup>,也不可能来自天然气中重烃气的热裂解。

如果原油或天然气被微生物降解,表明储层具有微生物活动的空间以及适合其生存的基本环境条件。微生物在储层中生存和活动需要满足3个条件:①地层孔隙度和渗透率能够满足细菌活动的最低需求,否则细菌无法对油气进行氧化降解。细菌一般仅为几微米到几十微米<sup>[17]</sup>,除碳酸盐岩层之外,砂泥岩地层的孔隙度和渗透率基本都能满足细菌活动的基本需求<sup>[18]</sup>;②地层水的水型和矿化度要合适,因为高矿化度会抑制微生物活动,中—低矿化度的  $\text{NaHCO}_3$  型或  $\text{CaCl}_2$  型地层水比较有利于微生物的繁殖<sup>[17]</sup>;③适当的温度,地层温度要适合细菌生存,微生物一般在低于  $80\text{ }^\circ\text{C}$  条件下生存,最适宜其繁殖和活动的温度为  $35\sim 42\text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[19]</sup>。

准噶尔盆地南缘主要是湖泊、沼泽以及河流相沉积<sup>[20]</sup>,岩性以砂泥岩为主<sup>[21]</sup>。实测的孔、渗分析资料表明,北天山山前地层孔隙度较小,储层深度在1000 m左右的孔隙度最小值为6%,向盆地腹部方向延伸,孔隙度有变大的趋势,相同深度的地层孔隙度可达15%,甚至更高。油田地层水分析资料表明,侏罗系地层水的水型主要是  $\text{NaHCO}_3$  型,矿化度比较低,为  $0.79\sim 26.4\text{ g/L}$ 。920 m 深度对应的地层

温度为 38.9 °C, 适宜微生物繁殖。由此可知, 准噶尔盆地南缘侏罗系浅部地层具备细菌降解天然气的基本条件。

南安 1 井 770~786 m 井段储层气样由于没有丙烷碳同位素资料, 不能确定该深度储层天然气是否发生碳同位素倒转。但从天然气组分含量来看, 乙烷和丙烷含量分别为 0.18% 和 0.26% (表 1), 乙烷含量小于丙烷, 具有乙烷遭受细菌降解的特征; 南安 1 井 509~534 m 井段储层天然气没有发生碳同位素倒转, 乙烷和丙烷组分含量相差不多。但南安 1 井上、下储层天然气  $\delta^{13}\text{C}_1$  值相差不多, 而上部储层天然气  $\delta^{13}\text{C}_2$  重于下部储层。由于浅部地层更加适合细菌活动, 由此推测, 南安 1 井上部储层天然气不但遭受乙烷菌降解, 也受到丙烷菌的降解, 降解程度要高于下部储层天然气。

齐 34 井异常天然气局部碳同位素倒转, 组分含量没有出现异常。天然气曲线研究表明, 齐古背斜天然气普遍发生碳同位素倒转, 但齐 34 井异常天然气  $\delta^{13}\text{C}_1$  明显轻于其他气样 (图 3a)。一般碳同位素倒转主要有 5 种原因<sup>[9]</sup>: ①有机气和无机气的混合; ②煤成气和油型气的混合; ③同型不同源气的混合或同源不同期气的混合; ④烷烃气某组分或某些组分被细菌氧化; ⑤地层温度增高。前人研究表明, 准噶尔盆地南缘天然气没有无机气的混入, 齐古背斜也不存在油型气<sup>[2]</sup>, 因此①和②不是齐 34 井异常天

然气碳同位素倒转的原因。在天然气碳同位素交换平衡作用控制下, 若地层温度超过 100 °C, 则  $\delta^{13}\text{C}_2 > \delta^{13}\text{C}_3$ ; 地层温度超过 150 °C, 则  $\delta^{13}\text{C}_1 > \delta^{13}\text{C}_2$ ; 若地层温度超过 200 °C, 会使正碳同位素系列变成负碳同位素系列, 即  $\delta^{13}\text{C}_1 > \delta^{13}\text{C}_2 > \delta^{13}\text{C}_3$ <sup>[22]</sup>。齐 34 井 920 m 处地层温度仅仅为 38.9 °C, 远没有达到促使天然气发生碳同位素倒转的温度, 因此地层温度也不是碳同位素倒转成因。独山子背斜天然气普遍发生碳同位素倒转, 应该是不同煤型气的混合。但齐 34 井异常天然气  $\delta^{13}\text{C}_1$  轻于同一背斜的其他气样, 乙烷组分含量为 0.87%, 同一背斜其他气样乙烷组分含量平均为 1.79%, 表明齐 34 井异常天然气为不同煤型气的混合, 同时还经历了乙烷菌降解作用。

### 3.2 独 87 井

独 87 井中新统储层深度为 1 148 m 的天然气  $\delta^{13}\text{C}_2$  值为  $-25.84\text{‰}$ , 重于独山子背斜其他井天然气,  $\delta^{13}\text{C}_2$  不仅能反应烃源岩性质, 也和成熟度有关, 表明该储层天然气成熟度高于其他井天然气, 或与其他井天然气相差无几。但天然气的干燥系数较低, 仅为 0.76, 小于独山子背斜的平均值 (0.81), 成熟度和干燥系数两者的结论相互矛盾。独 87 井天然气甲烷含量为 77.09%, 也小于其他井天然气,  $\delta^{13}\text{C}_1$  值为  $-21.59\text{‰}$ , 重于其他井天然气。Chung 等在研究天然气曲线时曾指出,  $\delta^{13}\text{C}_1$  变轻是由于细菌的降解作用, 并计算了天然气的降解程度;  $\delta^{13}\text{C}_1$  变重, 则是气藏盖层封盖能力不好, 天然气发生甲烷漏失, 漏失的气体中  $\delta^{13}\text{C}_1$  变轻, 残留气则具有较重的  $\delta^{13}\text{C}_1$ <sup>[23]</sup>。甲烷含量和  $\delta^{13}\text{C}_1$  以及天然气曲线分析 (图 3b) 表明, 独 87 井中新统储层上部盖层的封盖能力不好, 天然气为漏失或是扩散后的残余气。天然气曲线  $\delta^{13}\text{C}_2$ ,  $\delta^{13}\text{C}_3$  和  $\delta^{13}\text{C}_4$  之间的连线为上凸曲线, 表明有同源不同期天然气的混入。

## 4 Whitticar 图版的修正

独 87 井天然气为甲烷漏失后的残余气, 该气样数据点位于 Whitticar 图版的右下方 (图 2), 与独山子其他井天然气数据相比, 数据明显向右下方偏移。齐 34 井和南安 1 井天然气为遭受细菌降解的煤型气, 数据点没有落在 III 型干酪根和煤生成的天然气区域, 而是向左上方偏移, 落在 II 型干酪根生成的天然气区域。据此可以对 Whitticar 图版中的解释部分进行补充, Whitticar 图版中数据向 III 型干酪根和煤生成的天然气区域右下方偏移的天然气为甲烷

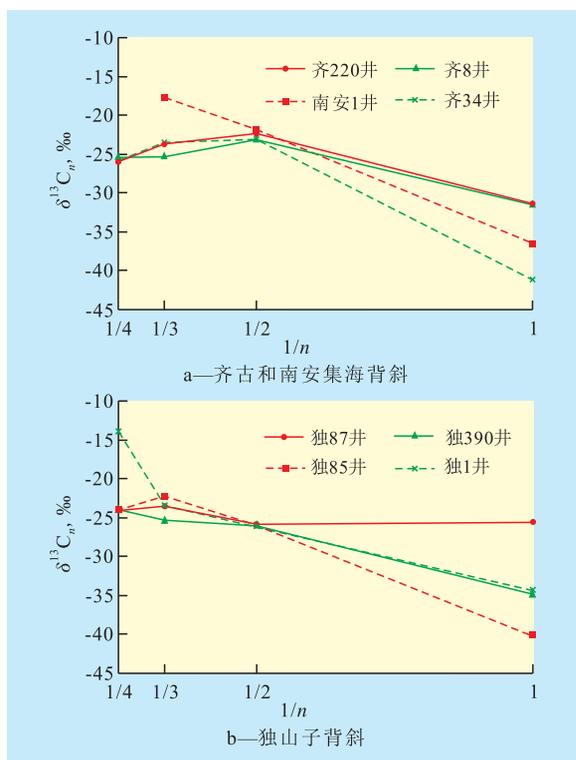


图3 准噶尔盆地南缘天然气曲线

漏失后的残余气,偏移距离越大,甲烷漏失的程度越高。由Ⅲ型干酪根和煤生成的天然气区域向左上方偏移,即使落到Ⅱ型干酪根生成的天然气区域内,也不能确定其母质为Ⅱ型干酪根,还有可能为Ⅲ型干酪根和煤生成的煤型气,成藏后遭受到乙烷菌降解作用,导致乙烷组分含量减小和碳同位素变重,甲烷含量相应增加及其碳同位素变轻。修正后的Whiticar图版,不仅可以研究原生或是受次生作用影响较弱的天然气的母质类型,还可以研究Ⅲ型干酪根和煤系烃源岩生成的天然气是否受乙烷菌的降解,以及天然气是否发生漏失或扩散。

## 5 结论

准噶尔盆地南缘的南安1井八道湾组储层、齐34井中、下侏罗统储层和独87井中新统储层异常天然气为热成因的煤型气。天然气组分分析表明,南安1井和齐34井异常天然气经历细菌降解作用,使天然气组分含量和碳同位素发生变化,在Whiticar图版上位于Ⅱ型干酪根生成的天然气区域;独87井异常天然气是由于上覆盖层封盖能力较差,天然气中甲烷发生漏失,导致残余天然气中甲烷组分含量减小,碳同位素变重,数据点偏移到Whiticar图版Ⅲ型干酪根和煤生成的天然气区域的右下方。据此对Whiticar图版进行必要的修正,正常煤型气数据点分布在Ⅲ型干酪根和煤生成的天然气区域内;如果经历过细菌降解作用,天然气数据点向母质区域左上方偏移,甚至有可能落到Ⅱ型干酪根生成的天然气区域内;如果发生甲烷漏失,天然气数据点向母质区域右下方偏移。据此不仅可以研究天然气的母质类型,也可以对细菌降解和甲烷漏失次生作用进行有效识别,避免对由此产生的天然气的母质类型认识上的误差。

### 参考文献:

- [1] 王屿涛,蒋少斌.准噶尔盆地南缘天然气垂向运移特征及成因分析[J].沉积学报,1997,15(2):70-74.
- [2] 宋占东,姜振学,宋岩,等.准噶尔盆地南缘天然气中 $N_2$ 地球化学特征及成因分析[J].天然气地球科学,2012,23(3):541-549.
- [3] Whiticar M J. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane [J]. Chemical Geology, 1999, 161(1/3):291-314.
- [4] 李涛,隋风贵,张奎华.准噶尔盆地南缘油气成藏组合特征及分布规律[J].油气地质与采收率,2006,13(1):55-58.
- [5] 魏东涛,贾东,赵应成,等.准噶尔盆地南缘原油地球化学特征[J].石油与天然气地质,2007,28(3):433-440.
- [6] 李吉君,卢双舫,薛海涛,等.准噶尔盆地南缘中下侏罗统煤系烃源岩生气史[J].新疆石油地质,2010,31(4):369-371.
- [7] Yanrong Z, Yulan C, Chongchun Z, et al. Variations of natural gas carbon isotope-type curves and their interpretation—A case study [J]. Organic Geochemistry, 2007, 38(8):1 398-1 415.
- [8] 韩国猛,石倩茹,司维柳,等.滨海地区深层天然气成因类型及气源分析[J].油气地质与采收率,2012,19(2):20-22.
- [9] 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.
- [10] 戴金星,秦胜飞,陶士振,等.中国天然气工业发展趋势和天然气地质理论重要进展[J].天然气地球科学,2005,16(2):127-142.
- [11] 王真.东营凹陷北部沙四段盐下天然气成因及来源[J].油气地质与采收率,2009,16(1):5-8.
- [12] 李文涛.民丰洼陷深层天然气地球化学成因[J].油气地质与采收率,2009,16(2):36-38.
- [13] 宋岩.影响天然气组分变化的主要因素[J].石油勘探与开发,1991,18(2):42-49.
- [14] 张林峰.济阳坳陷天然气的判识标志[J].石油实验地质,1991,13(4):355-369.
- [15] 戴金星,倪云燕,李剑,等.塔里木盆地和准噶尔盆地烷烃气碳同位素类型及其意义[J].新疆石油地质,2008,29(4):403-410.
- [16] 田辉,王招明,肖中尧,等.原油裂解成气动力学模拟及其意义[J].科学通报,2006,51(15):1 821-1 827.
- [17] 王政军,朱光有,王政国,等.原油降解气的形成条件及其特征[J].天然气工业,2008,28(11):29-33.
- [18] 王苗,廖远涛,邓大飞,等.南堡凹陷1号构造带东一段储层物性特征及其控制因素[J].油气地质与采收率,2012,19(4):14-17.
- [19] 朱光有,张水昌,赵文智,等.中国稠油区浅层天然气地球化学特征与成因机制[J].中国科学:D辑 地球科学,2007,37(S2):80-89.
- [20] 齐雪峰,吴晓智.准噶尔盆地南缘安集海河组沉积环境及油气地质意义[J].新疆石油地质,2009,30(3):289-292.
- [21] 宋元林,胡新平.呼图壁气田紫泥泉子储层特征及综合评价[J].西安石油学院学报:自然科学版,2001,16(4):15-19.
- [22] 秦胜飞.塔里木盆地库车坳陷异常天然气的成因[J].勘探家,1999,4(3):21-23.
- [23] Chung H M, Gormly J R, Squires R M. Origin of gaseous hydrocarbons in subsurface environments: Theoretical considerations of carbon isotope distribution [J]. Chemical Geology, 1988, 71(1/3):97-104.