中国科学: 地球科学 2010 年 第 40 卷 第 8 期: 996 ~ 1004
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

地球化学示踪体系在海相层系新型气源识别中的应用——以塔里木盆地和田河气田为例

刘文汇*, 张殿伟, 高波, 范明

中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083
* E-mail: whliu@pepris.com

收稿日期: 2009-05-18; 接受日期: 2010-02-05
石油化工联合基金项目(批准号: 40739902)资助

摘要 叠合盆地具有多种赋存状态的气源, 除常规干酪根和古油藏外, 分散可溶有机质是其重要直接气源, 因其具有生气潜力大、分布空间广泛和催化作用参与而易于裂解的特征成为海相层系高演化区域气源的重要类型. 通过对海相层系长期演化、多样性生气聚集过程的地质地球化学分析, 利用三元地球化学示踪体系, 研究塔里木盆地和田河气田天然气的来源和聚集过程, 认为和田河气田天然气为深部分散可溶有机质高演化裂解成气沿断裂带长距离运移成藏的产物. 这一结论对进一步扩大塔里木盆地台盆区油气勘探领域具有重要意义.

关键词
分散可溶有机质
裂解气
和田河气田
碳同位素组成
指标体系

我国海相烃源岩地层时代老、演化程度高, 客观准确地评价其生气潜力是海相油气勘探的基础. 生烃模拟实验表明, 在高过成熟阶段, 烃类气体的产生主要来自于烃源岩早期形成的可溶有机质的进一步裂解, 而并非来自烃源岩干酪根的热裂解作用. 在多期构造运动的地质背景下, 我国中西部叠合盆地海相烃源岩曾发生过多期生排烃作用, 生气潜力也随之转移到以聚集和分散形式赋存的可溶有机质中. 原油裂解气概念提出以来, 国内外学者对原油裂解气成气特征及其反应动力学进行了深入的研究[1~8], 部分学者进而将塔里木盆地和田河气田和四川盆地普光等气田天然气定性为原油裂解气[9~15]. 原油裂解气主要指聚集型可溶有机质——古油藏裂解成气, 而比古油藏分布更为广泛的分散可溶有机质成气却没有引起足够的重视. 分散可溶有机质通常有两种赋存形式: 一种为源内可溶有机质, 包括原始沉积的可溶有机质和演化过程中形成但未脱离母体的可溶有机质, 这种可溶有机质与不溶有机质共存, 从沉积初始到有机质演化的终结, 均未离开不溶有机质(干酪根)的赋存地质体(烃源岩); 另一种为源外分散可溶有机质, 它是随着演化程度的增加, 由烃源岩生成并排出, 分散于运移通道及储层中的可溶有机质, 主要表现为地层中的各种油气显示和含沥青岩石等. 在前人对沥青的研究中[16,17], 沥青更多的作为原油裂解成气的反应产物和反应证据, 而对其产物地球化学特征关注较少.

如何利用天然气的地球化学特征进行气源的有效判识, 主要通过正演和反演两个途径进行. 所谓正演就是在实验室, 利用温度与时间互补原理, 通过模拟实验再现不同类型气源在热演化过程中的成气特

引用格式: Liu W H, Zhang D W, Gao B, et al. Using geochemical tracing system to identify new types of gas sources in marine strata of the Hotan River Gas Field in the Tarim Basin. Sci China Earth Sci, 2010, 53: 844–853, doi: 10.1007/s11430-010-3067-3

征. 在实际应用中, 通过天然气地球化学特征来反演天然气的气源及成气过程. 通过多年研究, 天然气基本组分的相互关系、天然气稳定同位素、稀有气体同位素以及轻烃化合物已经发展成为天然气示踪方面的重要手段, 上述指标对天然气的示踪研究具有不同的指示意义, 而在此基础上建立的三元地球化学示踪体系, 以及指标间相互补充、相互验证和指标优先的原则为天然气的示踪研究提供了一个完整的思路和方法[18]. 本文通过对海相层系新型烃源-分散可溶有机质的室内热模拟研究, 利用其产物特征结合三元地球化学示踪体系对塔里木盆地和田河气田气源进行了探讨.

1 分散可溶有机质成烃模拟实验

分散与聚集可溶有机质均是烃源岩生排烃作用的产物, 其差异主要在于可溶有机质的聚集程度. 与(古)油藏相比, 分散可溶有机质聚集程度较低, 但分布范围更广, 与围岩接触面积更大; 另外, 部分分散可溶有机质储层沥青为古油藏演化或降解破坏的一个阶段性产物, 其生烃特征在一定程度上取决于油藏的早期演化过程.

1.1 样品和实验方法

本次模拟实验设计三类五种反应物进行模拟实验, 第一类为沥青砂岩样品, 可视为自然分散可溶有机质样品, 包括顺 1 井志留系沥青砂岩岩芯和柯坪剖面地表露头志留系沥青砂岩, 主要用于对比研究风化降解对沥青砂岩样品产气特征的影响; 第二类为人工配置分散可溶有机质样品, 将塔河油田 TK111 井原油分散到经过处理的灰岩和砂岩中, 对比研究不同介质对可溶有机质裂解成气的影响; 第三类为原油, 用TK111井原油直接裂解成气, 与前两类样品对比分散和聚集型可溶有机质成气特征上的差异.

塔河油田TK111 井原油是未经降解的正常原油, 原油密度为 0.9030 g/cm^3, 族组分中饱和烃、芳香烃、非烃和沥青质分别占 42.5%, 24.8%, 13.8%和 6.8%; C, H, O和N四种元素分别占 83.5%, 14.2%, 0.01%和 0.4%. 岩石介质选用建化水泥厂采石厂剖面奥陶系鹰山组(O_1y)灰岩, 该灰岩有机碳含量为 0.19%. 将样品粉碎至 100 目, 先用氯仿抽提可能存在的可溶有机质, 再在 550℃, 恒温 24 h的条件下对该灰岩进行高温演化处理, 使其不含具产气能力的有机质; 碎屑岩则选取塔里木盆地广泛分布的志留系砂岩作为模拟实验基质, 其纯化处理的方法与灰岩基质样品相同.

将样品和占样品重量 10%的水介质放入反应釜中, 采用程序恒速升温(升温速率为 1℃/min)后再恒温 24 h的加温方式, 每个温度点均采用原样单独加温的封闭式方式. 反应完毕, 待釜内温度自然降到一定温度(18℃)打开反应釜, 并对产物收集. 利用 Agilent6820 型气相色谱仪测定气体组分, DELTA^{plus} XL测定稳定碳同位素组成(表 1).

1.2 产物特征

储层沥青是聚集在储集层中的原油经历后生蚀变作用的产物, 由于演化程度和原始化学组成上的不同, 其生气潜力有很大区别. 图 1 为不同赋存状态可溶有机质生气潜力图. 由图 1 可见, 可溶有机质生气潜力巨大, 且具有晚期成气的显著特征. 无论是自然状态的可溶有机质(顺 1 井沥青砂岩)还是人工配比的不同类型分散型可溶有机质或原油, 生气量都随着温度的升高而增大, 大量生气的阶段发生在模拟温度 400℃以后. 分散可溶有机质在 500℃时达到最大生气量, 而后生气量降低, 而原油的生气量在 550℃达到最大(318.4 mg/gC). 由于分散可溶有机质具有无机矿物的催化作用, 大量生气的阶段明显早于聚集型可溶有机质(原油). 柯坪剖面露头志留系沥青砂岩由于长期受风化作用影响, 可溶有机质损耗很大, 致使其生烃潜力已经消耗殆尽, 最大生气潜力仅有 55.4 mg/gC, 远远低于顺 1 井志留系沥青砂岩的生气量(377.8 mg/gC). 此外, 从人工配比的不同类型分散可溶有机质样品生气潜力来看, 砂岩+原油和灰岩+原油两种类型的分散可溶有机质的生气特征还是存在一定的差异, 揭示两种介质中无机矿物对可溶有机质具有不同的催化作用.

天然气的甲烷碳同位素组成$\delta^{13}C_1$主要受热演化程度控制, 具有随着热演化程度增加逐渐变重的趋势. 但在实际的模拟实验过程中, 由于原油的裂解作用开始阶段主要发生在碳-碳键相对较弱的$^{12}C—^{12}C$键上, 因此, 形成了一些碳同位素相对较轻的甲烷, 造成 400℃时气体产物中甲烷的碳同位素变轻的现象. 而后, 随温度升高甲烷碳同位素组成逐渐变重. 在这点上, 无论是分散到砂岩还是灰岩中的原油, 都保留了这一特征, 与单纯原油裂解气一致. 顺 1 井和柯坪

表 1　不同可溶有机质模拟实验分析数据[a)]

反应物	T(℃)	$\delta^{13}C_1$(‰)	$\delta^{13}C_2$(‰)	C_1 (mg/gC)	C_2 (mg/gC)	C_3 (mg/gC)	C_4 (mg/gC)	C_5 (mg/gC)	C_{6+} (mg/gC)
TK111 井原油	350	–45.7	–42.2	2.97	2.62	3.61	1.35	0.36	0.55
	400	–50.8	–40.6	29.08	37.04	48.39	10.89	2.18	4.44
	450	–44.7	–36.2	96.92	77.00	89.10	19.08	0.76	1.97
	500	–38.8	–28.7	187.82	122.48	0.93	0.20	0.02	0.13
	550	–37.3	–26.0	245.80	107.37	0.34	0.12	–	0.10
TK111 井原油+砂岩	300	–35.7	–33.3	0.99	0.34	0.08	0.21	0.20	0.03
	350	–47.8	–41.4	5.79	5.53	1.05	6.16	4.78	0.97
	400	–50.0	–40.5	64.95	71.61	7.51	83.07	39.61	15.67
	450	–44.9	–35.8	124.59	98.26	4.09	96.83	14.32	17.15
	500	–40.0	–28.5	223.87	157.17	0.56	2.76	0.32	0.18
	550	–38.4	–26.6	237.71	115.93	0.40	0.36	0.14	0.05
TK111 井原油+灰岩	300	–34.4	–39.3	2.28	0.25	0.10	0.16	0.01	0.02
	350	–43.4	–41.8	6.64	5.16	1.62	5.41	5.82	0.48
	400	–49.3	–39.8	52.09	64.59	14.72	61.90	68.58	6.90
	450	–43.4	–35.2	143.80	123.59	6.76	101.05	30.71	17.05
	500	–38.4	–31.3	238.50	181.24	1.59	12.41	1.26	0.87
	550	–37.2	–28.3	240.70	122.95	0.87	0.37	0.15	0.05
顺 1 井志留系沥青砂岩	300	–47.6	–37.7	3.85	3.80	4.02	3.76	0.78	1.11
	350	–46.5	–37.9	30.53	39.09	40.25	29.97	6.67	18.22
	400	–41.5	–34.3	128.58	104.56	75.87	41.19	5.93	3.79
	450	–38.5	–31.8	208.48	138.68	23.47	4.10	0.12	1.42
	500	–36.3	–22.3	307.28	67.33	0.70	0.60	0.05	1.83
	550	–31.6	–9.2	328.78	7.45	0.18	0.16	–	3.58
柯坪剖面志留系沥青砂岩	300	–46.7	–31.5	1.49	0.25	0.36	0.12	0.03	0.11
	350	–42.7	–30.1	3.12	0.90	1.04	0.32	0.07	0.13
	400	–39.5	–35.7	7.31	2.38	1.89	0.50	0.07	0.02
	450	–37.0	–34.9	12.60	2.18	1.05	0.17	–	0.04
	500	–34.7	–29.8	39.67	5.57	0.17	0.04	–	2.75

a) –表示未检测出

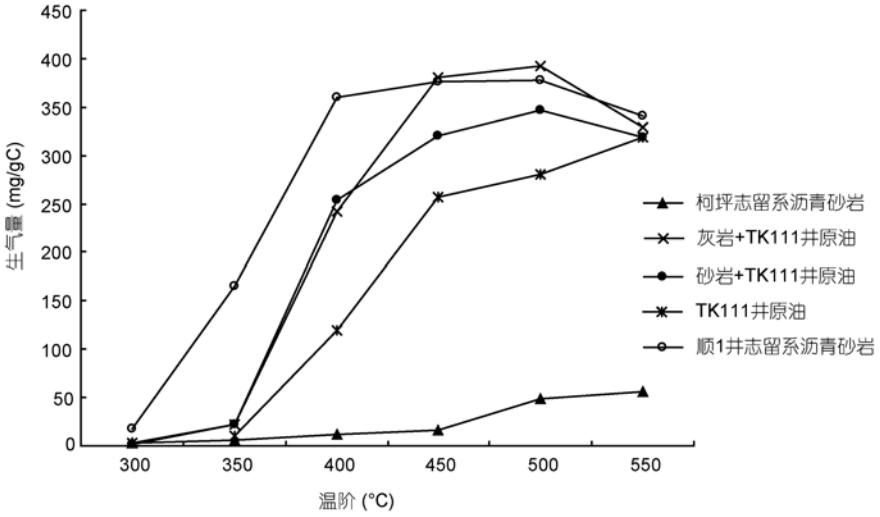

图 1　不同形式可溶有机质生气潜力图

剖面的志留系沥青砂岩由于在前期的演化过程中, 其中的较轻组分已经在生烃过程或者降解过程中损失掉了, 因此, 两个沥青砂岩样品的起始$\delta^{13}C_1$分别为−47.6‰和−46.7‰, 略重于原油、原油+砂岩和原油+灰岩样品的$\delta^{13}C_1$: −50.8‰, −50.0‰和−49.3‰(图 2), 缺失了前半部分演化特征, 在模拟过程中, 这两个沥青砂岩样品的甲烷碳同位素组成与热演化程度保持着很好的正相关关系. 相对甲烷碳同位素组成, 天然气乙烷碳同位素组成主要受母质继承效应控制, 表现为与产气母质的同位素组成相关. 在图 3 中TK111 井原油与TK111 井原油+砂岩和TK111 井原油+灰岩所产生天然气的乙烷碳同位素组成的变化趋势一致, 结合图 2 中上述三种反应物的甲烷碳同位素相似的变化特征, 说明不论是分散型还是聚集型可溶有机质, 只要其组成一致, 其产物的碳同位素组成则具有相似的特征. 而顺 1 井志留系沥青砂岩, 在前期演化过程中消耗了可溶有机质同位素组成较轻的部分, 因此, 其在 350℃后所产出的天然气乙烷碳同位素组成始终重于TK111 井原油与TK111 井原油+砂岩和TK111 井原油+灰岩所产生天然气. 柯坪露头志留系沥青砂岩在反应初期, 其产物具有最重的乙烷碳同位素组成, 但在 350℃后忽然降低, 在 450℃

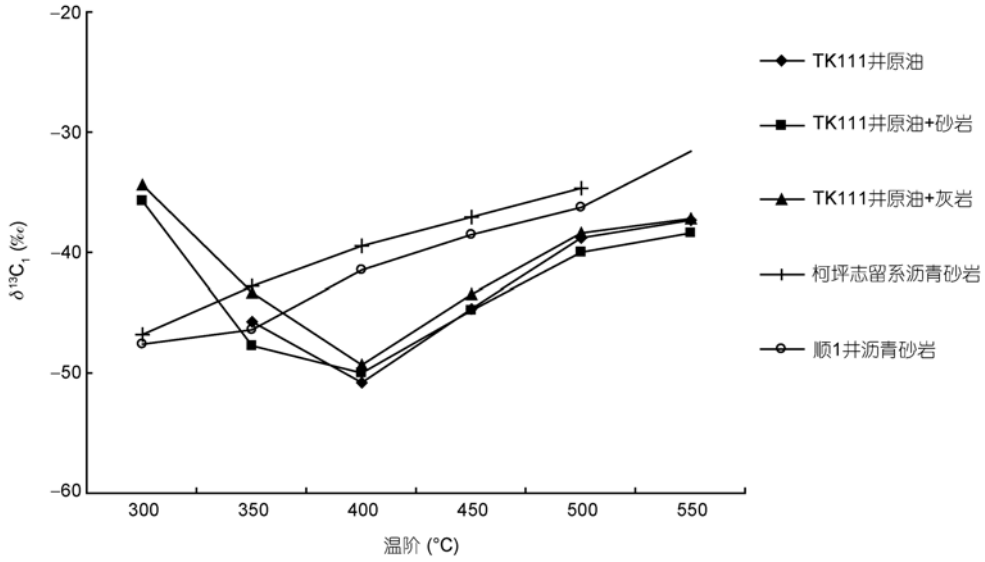

图 2　不同形式可溶有机质$\delta^{13}C_1$随温度变化规律

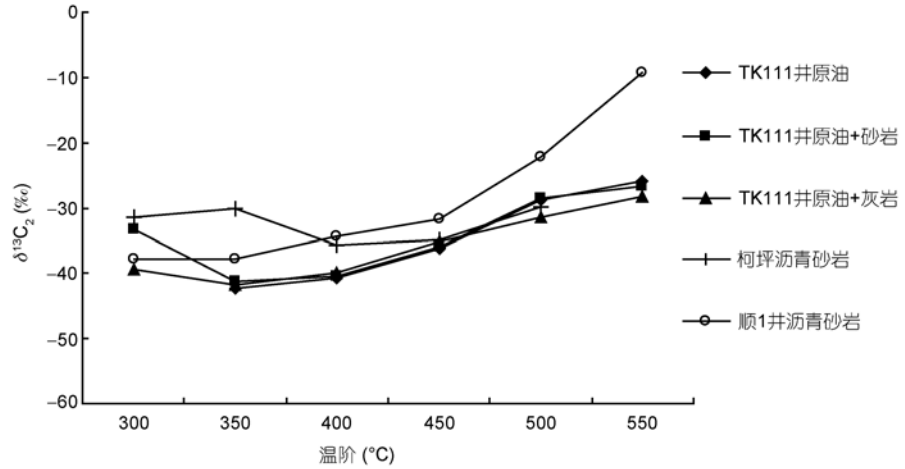

图 3　不同形式可溶有机质$\delta^{13}C_2$随温度变化规律

与原油等样品产物的乙烷碳同位素组成相当. 图 3 很好地反映了天然气乙烷碳同位素组成受母质同位素组成控制效应和随演化程度增加而变重的趋势.

1.3 示踪指标的建立

现有用于判识原油裂解气的地球化学指标主要是利用Behar等[1]以及Prinzhofer和Huc[19]开展的模拟实验数据做出的图版, 利用$\ln(C_1/C_2)$-$\ln(C_2/C_3)$和$\ln(C_2/C_3)$-$\delta^{13}C_2$-$\delta^{13}C_3$来判识天然气的成因[1,19]. 鉴别特征主要为: 干酪根裂解气C_1/C_2相对C_2/C_3增加更快, 后者基本不变, 而油的二次裂解气特征刚好相反; 干酪根裂解气$\ln(C_2/C_3)$变化较小, $\delta^{13}C_2$-$\delta^{13}C_3$变化较大, 原油裂解气特征相反.

通过对不同形式的可溶有机质产气的组分特征进行分析发现, 无论是原油分散到砂岩或者灰岩, 还是实际的沥青砂岩均具有和原油裂解气相同的组分变化特征(图 4), $\ln(C_2/C_3)$相对$\ln(C_1/C_2)$增加更快, 后者基本不变. 因此, 在利用上述指标进行气藏裂解气鉴别时, 应结合实际地质背景, 考虑到分散可溶有机质的贡献. 由于模拟实验天然气组分中重烃含量很少, 无法获得足够的同位素组成数据, 没有办法验证裂解气的同位素鉴别指标.

通过上面的实验可以看出, 分散可溶有机质与聚集可溶有机质由于催化作用强弱和演化阶段的不同, 在产生气体的组分特征及同位素特征上存在一定的差异, 主要表现为分散可溶有机质具有和原油裂解气相似的组分变化规律, 但产物碳同位素组成相对较重. 根据研究, 在催化条件下, 原油裂解气中苯、甲苯以及环烷烃的含量较高, 这也可以作为分散可溶有机质成气的一个鉴别特征[20,21].

2 和田河气田天然气气源探讨

和田河气田是塔里木盆地迄今为止探明的最大碳酸盐岩气田, 位于巴楚隆起南缘的玛扎塔格构造带上, 并受玛扎塔格断裂构造带南、北两条大断裂控制, 断层断开寒武系至新近系, 为深部物质参与提供了构造条件. 和田河气田的地质背景和天然气地球化学特征前人已经开展了大量的工作, 和田河气田是最早被定性存在原油裂解气贡献的气藏之一[6,9,10], 也有部分学者认为其为水溶气成因[22]. 本次研究中, 利用三元地球化学示踪体系以及指标间相互补充、相互验证和指标优先的原则探讨分散可溶有机质对和田河气田的贡献.

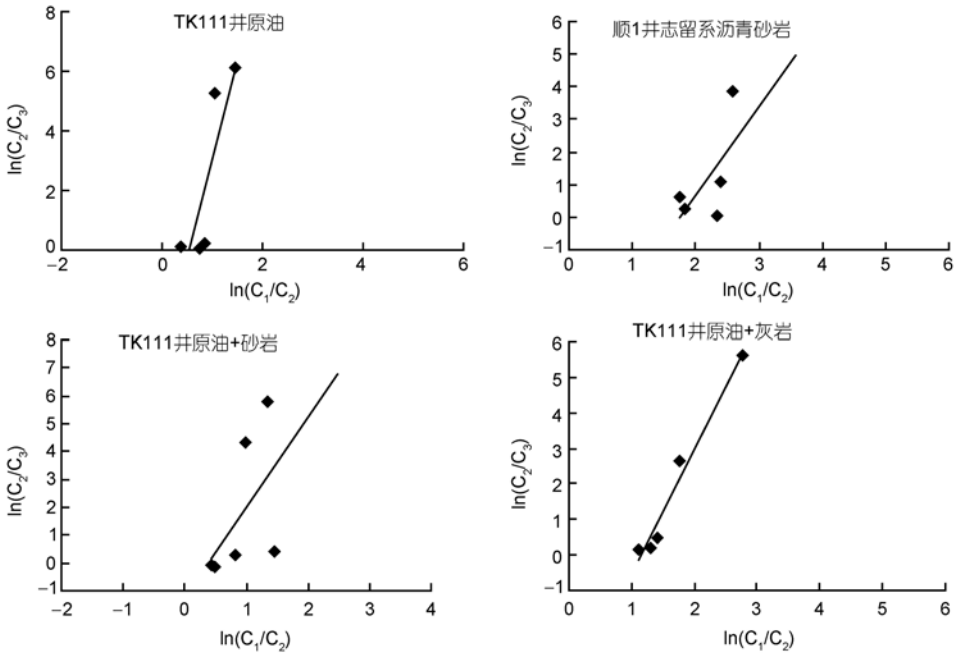

图 4 不同形式可溶有机质成气组分特征对比

2.1　天然气稀有气体同位素地球化学特征

在三元地球化学指标体系的指标优先原则下, 天然气的稀有气体同位素是优先考虑的指标, 在排除掉无机组分参与的前提下, 稳定碳和氢等同位素指标才能有效应用. 和田河天然气$^3He/^4He$值在1.07×10^{-7}~1.21×10^{-7}范围内, 为壳源成因. 稀有气体$^3He/^4He$值与大地构造活动背景具有很好的相关性, 随着$^3He/^4He$值增大, 表明天然气藏的壳幔连通(断裂切割)程度逐渐增强[23]. 从图 5 中可以看出和田河气$^3He/^4He$值明显高于塔里木盆地其他地区天然气, 仅次于位于盆地边缘受幔源物质影响的阿克 1 井. 这与和田河气田南北两侧发育的两条深切到寒武系的逆断层以及晚海西期火山活动有关. 和田河天然气$^{40}Ar/^{36}Ar$同位素比值为 2094~2287, 为塔里木盆地最重的氩同位素组成. 根据地质年代与氩同位素组成的对应关系[24], 和田河天然气$^{40}Ar/^{36}Ar$同位素比值与寒武系-奥陶系地层相对应, 考虑到碳酸盐岩烃源岩中K元素较低的影响, 和田河天然气应主要源自寒武系烃源岩.

2.2　组分及碳同位素地球化学特征

利用稀有气体排除幔源贡献后, 可利用天然气的组分及碳同位素组成来判识其成因类型. 和田河气田天然气以烃类组分为主, 其中CH_4占 75%~85%, 重烃含量很低, 占 0.5%~4%; 非烃气体含量较高, 一般在 10%~25%之间, 主要为N_2和CO_2, 并含有微量的H_2S. 天然气的$\delta^{13}C_1$介于–37.8‰~–34.9‰之间, 干燥系数基本大于 0.95, 表现为典型的油型裂解干　气[9,10]. 天然气$\ln(C_1/C_2)$-$\ln(C_2/C_3)$关系(图 6)表现为原油裂解气或分散可溶有机质裂解成气特征. 较好线性关系的天然气的碳同位素系列代表天然气的单一来源, 和田河气田天然气系列碳同位素明显表现为两阶段模式, 天然气甲烷碳同位素偏重(图 7), 表明该区天然气为多期充注和复合成因.

2.3　轻烃地球化学特征

轻烃是近些年发展起来的地球化学指标, 在地球化学指标体系中, 对稳定同位素及稀有气体同位素是重要的补充. 环己烷和甲基环己烷是天然气轻烃组成的两个重要化合物, 通过对大量烃源岩热模拟产物中环己烷和甲基环己烷碳同位素测定结果表明, 随着热模拟温度的增加, 环己烷和甲基环己烷碳同位素值变化较小, 环己烷和甲基环己烷碳同位素值变化与有机质类型之间有很好的相关性[25]. 和田河气田天然气轻烃中$\delta^{13}C_{环己烷}$和$\delta^{13}C_{甲基环己烷}$值均轻于–27‰, 可与库车前陆天然气很好地区分开来(图 8), 验证了和田河天然气为油型气的结论.

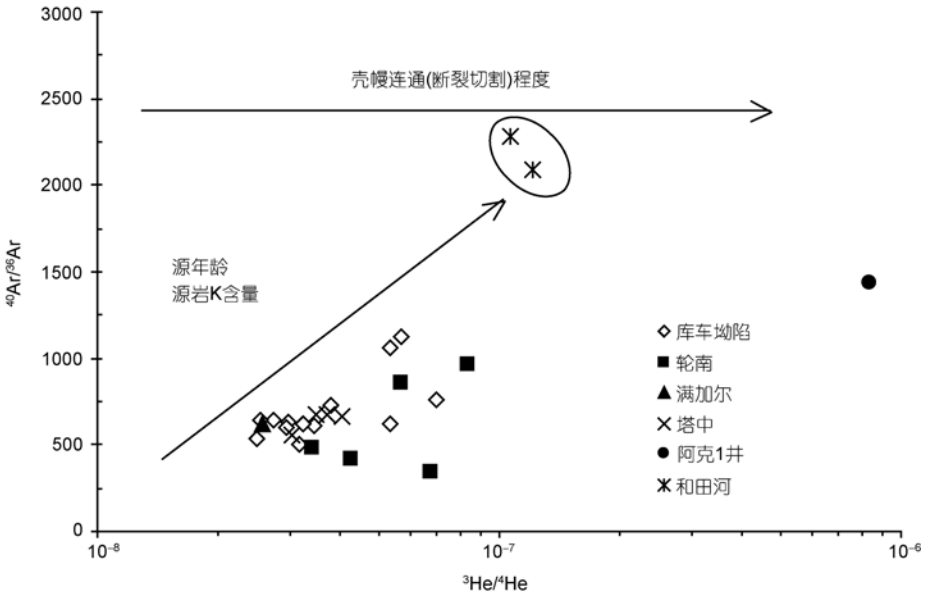

图 5　塔里木盆地天然气稀有气体氦和氩同位素的关系

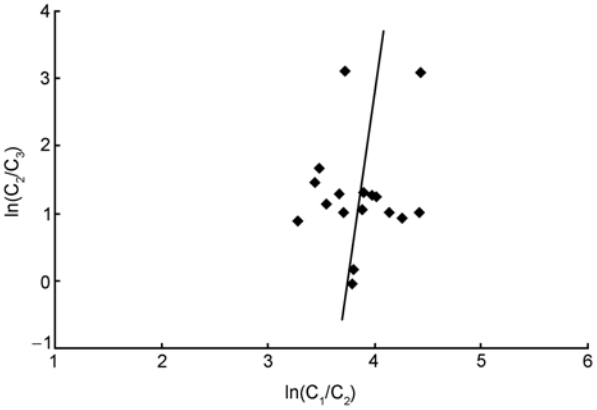

图 6　和田河气田天然气$\ln(C_1/C_2)$与$\ln(C_2/C_3)$的关系

据文献[14]

在催化条件下, 原油裂解气中苯、甲苯以及环烷烃的含量较高, 利用这一鉴别特征, 我们可以进一步补充和田河天然气为原油或分散可溶有机质裂解生气的结论. 和田河天然气轻烃中链烷烃相对含量最高, 分布在 46.1%~66.5%之间(表 2, 图 9), 环烷烃含量分布在 24.9%~40.1%之间, 芳烃相对含量较低, 为 8.7%~13.8%. 这种分布特征反映其为典型腐泥型烃源岩来源, 考虑到和田河天然气环烷烃较高的特点, 和田河气田天然气主要为分散可溶有机质成气产物. 此外, 模拟实验研究表明, 对于原油裂解气而言, 气体组分中重烃含量较高, 为典型的湿气, 而分散可溶有机质由于无机矿物的催化作用, 产物相对偏干. 和田河气田天然气干燥系数大, 为典型的油型裂解干气, 也是该区天然气主要源自分散可溶有机质裂解的一个有力证据.

2.4　和田河气田气源分析

和田河地区寒武系发育一套泥质、泥晶白云质灰岩, 奥陶系为泥灰岩, 石炭系为泥岩和碳酸盐岩, 晚加里东-早海西期为其主要生油期, 现今已处于高成熟阶段晚期[26]. 和田河气田储层普遍发育沥青, 奥陶系储层沥青为寒武系古油藏向上运移, 在晚加里东-

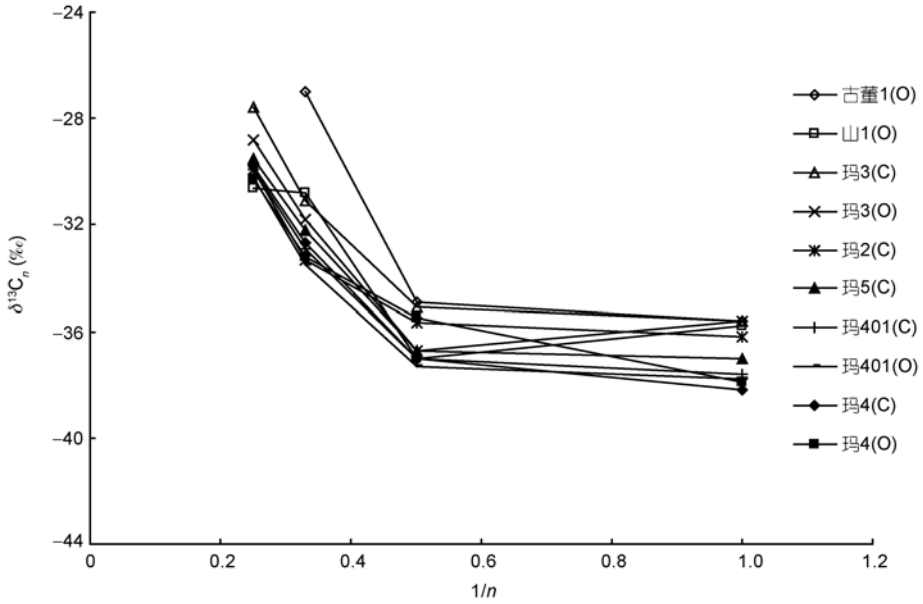

图 7　和田河气田天然气系列碳同位素图

表 2　和田河气田天然气链烷烃、环烷烃和芳烃组成数据

井号	深度(m)	层位	链烷烃(%)	环烷烃(%)	芳烃(%)
玛 4	2238~2260	O	46.1	40.1	13.8
玛 2	1462~1501	C	56.8	33.7	9.5
玛 4	2380~2395	O	66.5	24.9	8.7

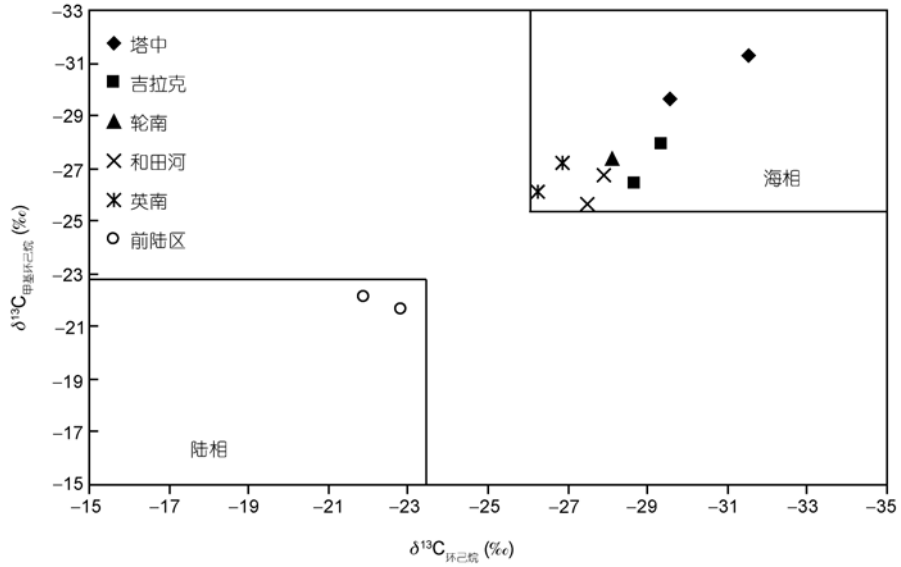

图 8　塔里木盆地天然气环己烷与甲基环己烷稳定碳同位素的关系

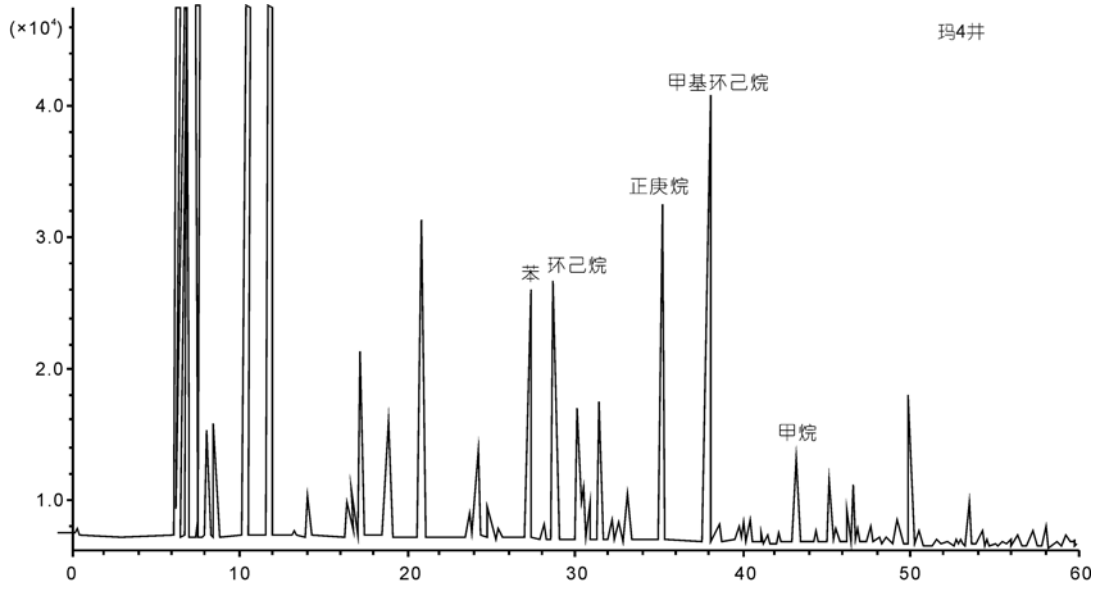

图 9　和田河气田天然气轻烃色谱图

早海西期遭受破坏形成[27]. 喜山晚期和田河气田形成现今构造圈闭, 而此时寒武系烃源岩已过了其生气高峰, 和田河气田天然气的直接气源来源于寒武系和奥陶系分散可溶有机质的裂解成气. 根据该区天然气具有较重的甲烷碳同位素组成以及天然气中苯、甲苯和环烷烃含量较高的特征[21], 综合分析认为和田河气田天然气的直接气源应来自该区分散可溶有机质的贡献.

3　结论

(1) 聚集和分散型可溶有机质具有相似性和演化连续性的特点, 模拟实验表明, 分散可溶有机质产物具有相对较重的甲烷和乙烷稳定碳同位素组成, $\ln(C_2/C_3)$-$\ln(C_1/C_2)$特征与原油裂解气相似.

(2) 根据天然气组分、同位素和轻烃三元地球化学指标体系, 并结合指标优先、相互印证和相互补充

的原则, 判识和田河气田天然气为深部分散可溶有机质高演化裂解成气沿断裂带长距离运移成藏的产物.

(3) 分散可溶有机质在地质演化过程中保留了较高的生气潜力, 并具有更好的催化条件, 在较低温度就能达到生气高峰, 这一特征对于我国广泛发育的叠合盆地而言, 无疑会拓宽天然气的勘探领域, 为寻找深层海相天然气提供新的思路.

致谢 感谢审稿专家提出的宝贵意见.

参考文献

1 Behar F, Kressmann S, Rudkiewicz J L, et al. Experimental simulation in a confined system and kinetic modeling of kerogen and oil cracking. Org Geochem, 1992, 19: 173—189
2 Behar F, Vandenbroucke M, Teermann S C, et al. Experimental simulation of gas generation from coals and a marine kerogen. Chem Geol, 1995, 126: 247—260
3 卢双舫, 付晓泰, 刘晓艳, 等. 油成气的动力学模型及其标定. 天然气工业, 1996, 16: 6—9
4 Vandenbroucke M, Behar F, Rudkiewicz J L. Kinetic modeling of petroleum formation and cracking: Implications from the high pressure/high temperature Elgin Field (UK, North Sea). Org Geochem, 1999, 30: 1105—1125
5 王振平, 付晓泰, 卢双舫, 等. 原油裂解成气模拟实验、产物特征及其意义. 天然气工业, 2001, 46: 645—650
6 赵孟军, 卢双舫. 原油二次裂解气-天然气重要的生成途径. 地质论评, 2000, 46: 645—650
7 赵文智, 王兆云, 张水昌, 等. 油裂解生气是海相气源灶高效成气的重要途径. 科学通报, 2006, 51: 589—595
8 王云鹏, 王兆云, 邹艳荣. 原油裂解气的形成、鉴别与成藏研究进展. 见: 赵文智, 主编. 天然气地质与气藏经济开发理论基础. 北京: 地质出版社, 2004. 111—126
9 周新源, 杨海军, 李勇, 等. 塔里木盆地和田河气田的勘探与发现. 海相油气地质, 2006, 11: 55—62
10 王招明, 王清华, 王媛. 塔里木盆地和田河气田成藏条件及控制因素. 海相油气地质, 2000, 5: 124—132
11 张水昌, 朱光有, 陈建平, 等. 四川盆地川东北飞仙关组高含硫化氢大型气田群气源探讨. 科学通报, 2007, 52(增刊): 86—94
12 谢增业, 田世诚, 魏国齐, 等. 川东北飞仙关组储层沥青与古油藏研究. 天然气地球科学, 2005, 16: 283—289
13 朱亚东, 王允诚, 高培丞, 等. 川东北部飞仙关组气藏气体组分成因研究. 西南石油大学学报, 2007, 29: 34—38
14 赵孟军, 张水昌. 塔里木盆地天然气成因类型及成藏条件. 中国石油勘探, 2001, 6: 27—32
15 蔡勋育, 朱扬明, 黄仁春. 普光气田沥青地球化学特征及成因. 石油与天然气地质, 2006, 27: 340—348
16 王云鹏, 耿安松, 刘德汉, 等. 页岩、煤、沥青和原油的生气实验研究. 沉积学报, 2004, 22(增刊): 106—109
17 冯加良, 吴士清. 沥青热解模拟及再生烃研究. 南方油气地质, 1995, 1: 43—50
18 刘文汇, 陈孟晋, 关平, 等. 天然气成藏过程的三元地球化学示踪体系. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37: 908—915
19 Prinzhofer A, Huc A Y. Genetic and post-genetic molecular and isotopic fractionations in natural gases. Chem Geol, 1995, 126: 281—290
20 Mango F D, Hightower H W. The catalytic decomposition of petroleum into natural gas. Geochim Cosmochim Acta, 1997, 61: 5347—5350
21 王红军, 赵文智, 胡国艺, 等. 塔里木盆地海相成因天然气的两种聚集模式. 科学通报, 2007, 52(增刊): 167—173
22 秦胜飞, 赵靖舟, 李梅, 等. 水溶天然气运移地球化学示踪——以塔里木盆地和田河气田为例. 地学前缘, 2006, 13: 524—532
23 刘文汇, 徐永昌. 天然气中氦氩同位素组成意义. 科学通报, 1993, 38: 818—821
24 刘文汇, 徐永昌. 氩同位素气源对比原理及应用. 地质地球化学, 1994, 6: 9—12
25 胡国艺, 肖中尧, 罗霞, 等. 两种裂解气中轻烃组成差异性及其应用. 天然气工业, 2005, 25: 23—25
26 周新源, 贾承造, 王招明, 等. 和田河气田碳酸盐岩气藏特征及多期成藏史. 科学通报, 2002, 47(增刊): 131—136
27 张国成, 王廷栋, 徐志明, 等. 塔里木盆地和田河气田碳酸盐岩储层的多期次多来源油气聚集特征. 地学前缘, 2000, 7(增刊): 239—248