

文章编号: 0253-9985(2005)06-0736-06

低熟泥灰岩、钙质泥岩干酪根脂肪酸的分布特征及赋存形式

孟仟祥, 郑建京, 房 玄, 孙敏卓

(中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气研究中心, 甘肃兰州 730000)

摘要: 柴达木盆地第三系低熟、低有机碳烃源岩干酪根中检测出直链一元酸、直链二元酸和芳香酸 3 个系列。其中以直链一元酸相对丰度最高, $C_{16:0}$ 十六酸为主峰 (饱和脂肪酸), 呈明显偶碳数优势特征。干酪根脂肪酸赋存量是强干酪根脂肪酸的 3 倍以上, 且前者直链二元酸的相对丰度大大高于后者。以脂肪酸钙 (镁) 盐和脂肪酸形式富集在源岩碳酸盐晶体中的脂肪酸含量远远大于赋存在干酪根网络中的量。当碳酸盐晶体被高温 (及复杂地质条件) 分解时, 这些脂肪酸盐和脂肪酸主要会被裂解为小分子烃——气态烃。柴达木盆地沉积有机质中的硫以五元、六元和八元环状稳定态存在, 因其强烈的电负性, 可能会对脂肪酸 (盐) 的富集及稳定存在作出贡献。

关键词: 碳酸盐晶体; 脂肪酸 (盐); 干酪根; 生烃; 第三系; 柴达木盆地

中图分类号: TE125.2 **文献标识码:** A

Distribution and occurrence of kerogen fatty acids in low mature marl and calcareous mudstone

Meng Qianxiang, Zheng Jianjing, Fang Xuan, Sun Minzhuo

(Lanzhou Research Center of Oil & Gas Resources, Institute of Geology and Geophysics

Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu)

Abstract Three acid series including straight chain monoacid, straight chain binary acid and aromatic acid have been detected in the kerogen of low mature Tertiary source rocks with low organic carbon content in Qaidam basin. Relative abundance of straight chain monoacid is the highest among these three acid series, and $C_{16:0}$ acid occurs as the main peak (saturated fatty acid), with obvious even carbon number predominance. The volume of kerogen fatty acid is over three times that of enhanced kerogen fatty acid, and the former has much larger relative abundance of straight chain binary acid than the latter. In addition, the volume of fatty acid that enrich in carbonate crystals of source rocks in the form of calcium (magnesium) fatty acid salt and fatty acid is far greater than that occur in kerogen network. When these carbonate crystals were decomposed at high temperature (and at complex geologic conditions), the fatty acid salt and fatty acid might be cracked into small molecular hydrocarbon, i.e., gaseous hydrocarbon. The sulfur in deposited organic matters in the study area occur as pentabasic, hexabasic and octatomic ring stable states, and would make contribution to the enrichment and existence of fatty acid (salt) due to its strong electron negativity.

Key words carbonate crystal; fatty acid (salt); kerogen; hydrocarbon generation; Tertiary; Qaidam basin

近年来地球化学家在生油理论上的一大突破就是对 Tissot 干酪根晚期热解成油理论的重新认识, 非干酪根成烃理论日趋成熟^[1,2]。自 20 世纪

80 年代以来, 低熟原油和天然气的发现更引起人们对脂肪酸赋存形式和成烃理论研究的重视^[3,4]。我国许多盆地碳酸盐岩及含钙质烃源岩虽然有机

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2001CB209102)

第一作者简介: 孟仟祥, 男, 57 岁, 研究员, 有机地球化学

收稿日期: 2005-07-27

质含量低,但却成为有效生烃源岩^[5]。这些源岩中有机酸盐和有机酸的赋存形式及生烃、排烃机理开始引起研究者的兴趣,但很少见到报道。本文对柴达木盆地第三系低熟、低有机碳含量的泥灰岩和钙质泥岩干酪根及碳酸盐晶体中脂肪酸盐和脂肪酸的分布特征、赋存量及赋存形式进行了较系统的研究,对其生烃机制尤其是生成气态烃的机制进行了初步探讨。

1 样品及实验方法

1.1 样品

样品采自柴达木盆地跃东 110 井和七个泉 26 井的低熟烃源岩。样品分布及索氏抽提沥青“*A*”的族组成数据见表 1。

样品采自 *N*₁¹和 *E*₃²的低成熟、低有机碳及具不同丰度碳酸盐含量的含硫烃源岩。其索氏抽提沥青“*A*”的族组成中高丰度的非烃表明,样品有机质演化程度很低。

1.2 实验方法

样品粉碎至 120 目后,经氯仿:甲醇:丙酮 = 7.0:1.5:1.5 三元溶剂索氏抽提 48 h 沥青“*A*”经正己烷沉淀沥青质后用硅胶:氧化铝 = 4:1 柱色层分离为饱和烃、芳烃和非烃。其中饱和烃和芳烃直接做 GC-MS(气相色谱-质谱)分析,非烃和沥青质用经典法抽提其中的有机酸经甲酯化后做 GC-MS 分析。沥青质做不同温度热模拟实验后探讨其有机酸的演化规律。三元抽提后岩渣做烃源岩干酪根中的脂肪酸赋存形式实验。

1.2.1 酸解前脂肪酸萃取

1) 经三元抽提后将 C-1 和 C-2 岩渣准确称重,分别用 5%的 NaOH-CH₃OH 溶液 70℃搅拌皂化 3 h 皂化结束后滤出上清液,用蒸馏水洗涤岩渣,两液合并后用 HCl 酸化至 pH = 1;用乙醚萃取有机相,得干酪根脂肪酸(样品经 BF₃-CH₃OH 甲酯化后做 GC-MS 分析)。

2) 经上述抽提干酪根脂肪酸后将余岩渣准确称重,分别加入 8%的 NaOH-CH₃OH 溶液,密封于

石英玻璃管内,在高压釜中经 200℃,2 h 皂化;滤出上清液,余岩渣经蒸馏水洗涤,两液合并后用 HCl 酸化至 pH = 1;用乙醚萃取有机相,得强干酪根脂肪酸(样品经 BF₃-CH₃OH 甲酯化后做 GC-MS 分析)。

1.2.2 酸解后脂肪酸萃取

1) 经三元索氏抽提后将 C-1 和 C-2 岩渣分别用 10%的盐酸溶液酸解(搅拌)至无气泡,滤掉上清液;渣岩继续用蒸馏水洗涤至 pH = 7,洗出液用氯仿萃取有机相并入岩渣。洗涤后岩渣分别用 5%的 NaOH-CH₃OH 溶液 70℃皂化 3 h 分离出上清液,再经蒸馏水洗涤,两液合并后经 HCl 酸化至 pH = 1;用乙醚萃取有机相,得破坏碳酸盐结晶后的干酪根脂肪酸(样品经 BF₃-CH₃OH 甲酯化后做 GC-MS 分析)。

2) 经上述抽提干酪根脂肪酸后将剩余岩渣准确称重,用 8%的 NaOH-CH₃OH 溶液密封于石英玻璃管中,在高压釜中经 200℃、2 h 皂化;滤出上清液,剩岩渣继续用蒸馏水洗涤,两液合并后经 HCl 酸化至 pH = 1;用乙醚萃取有机相,得破坏碳酸盐结晶后的强干酪根脂肪酸(样品经 BF₃-CH₃OH 甲酯化后做 GC-MS 分析)。

1.2.3 热重-差热(TG-DTA)实验

取碳酸钙、硬脂酸钙、硬脂酸镁、硬脂酸,在 TG-DTA 联用仪上以 20℃/min 的速率从室温升至 1 000℃,分别测定碳酸钙晶体的分解温度及硬脂酸盐和硬脂酸的裂解温度。

2 脂肪酸分布特征

2.1 酸解前

图 1 和图 2 是烃源岩经三元索氏抽提后岩渣分别用 70℃,5%的 NaOH-CH₃OH 溶液和 200℃,8%的 NaOH-CH₃OH 溶液(石英管密封)抽提所得干酪根脂肪酸与强干酪根脂肪酸的 GC-MS 总离子流图。每次样品分析均用 *n*C₁₃ 酸做标样与样品共注进行定性和定量分析。

2.1.1 干酪根脂肪酸

C-1 和 C-2 样品中干酪根脂肪酸检测出 3

表 1 样品分布及沥青“*A*”族组成

Table 1 Distribution of samples and group composition of bitumen “*A*”

样号	岩性	产层	镜质体反射率 /%	深度 /m	有机碳含量 /%	碳酸盐含量 /%	抽提沥青“ <i>A</i> ”的族组成 /%			
							饱和烃	芳烃	非烃	沥青质
C-1	泥灰岩	<i>N</i> ₁ ¹	0.53	2 354	0.47	59.17	37.50	17.18	38.03	7.29
C-2	钙质泥岩	<i>E</i> ₃ ²	0.32	1 720	0.13	17.27	21.22	12.00	61.15	5.63

个系列: 直链一元酸、直链二元酸和芳香酸 (图 1)。直链一元脂肪酸的碳数分布分别为 $C_{11}-C_{24}$ 和 $C_{11}-C_{28}$, 均以 $nC_{16:0}$ 相对丰度最高为特征, 具明显偶碳数优势; $C_{11}-C_{18}$ 较低碳数直链一元脂肪酸的相对丰度明显大于 C_{19} 以后高碳数直链一元脂肪酸, 是藻类和细菌微生物成因脂肪酸的分布特征^[6~10]。两样品干酪根脂肪酸中均检测出丰富的直链二元酸系列化合物, 碳数分布分别为 C_8-C_{21} 和 C_8-C_{24} , 前峰群以 C_9 二元酸相对丰度最高, 后峰均以 C_{18} 二元酸为主峰。两样品干酪根脂肪酸中检测出相对丰度较高的芳香酸系列化合物, 主要有苯二甲酸、苯三甲酸和萘甲酸, 其中以苯二甲酸的相对丰度最高。

两样品干酪根脂肪酸中一元酸: 二元酸: 芳香酸值分别为 1.00: 0.82: 0.54 和 1.00: 1.03: 0.20 表明干酪根脂肪酸中除有丰富的一元酸外还富集着丰富的直链二元酸系列和明显的芳香酸, 与抽提沥青脂肪酸中主要富集直链一元脂肪酸有别^[12,9,11]。

2.1.2 强干酪根脂肪酸

图 2 是 C-1 和 C-2 烃源岩渣中强干酪根脂肪酸 (甲酯) 总离子流图。两样品中均检测出直链一

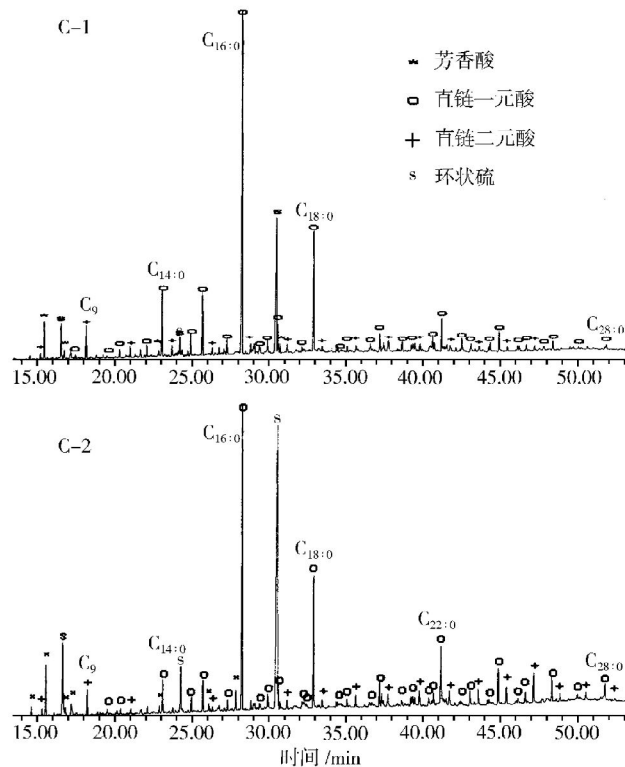


图 2 C-1 和 C-2 岩样强干酪根脂肪酸

GC-MS 总离子流

Fig. 2 GC/MSD TIC of enhanced kerogen fatty acid in C-1 and C-2 samples

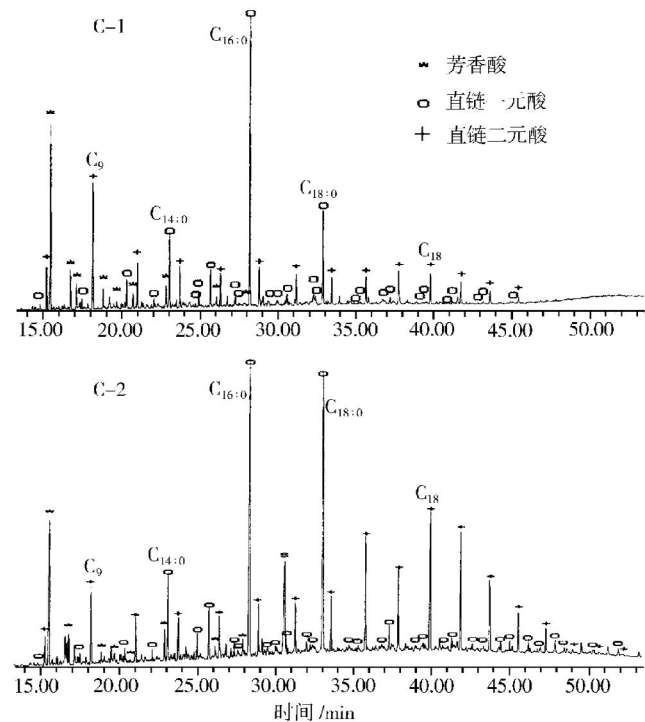


图 1 C-1 和 C-2 岩样干酪根脂肪酸

GC-MS 总离子流

Fig. 1 GC/MSD TIC of kerogen fatty acid in C-1 and C-2 samples

元酸、直链二元酸和芳香酸 3 个系列化合物, 且分布特征相似。两样品强干酪根脂肪酸中相对丰度最高的均是直链一元酸系列, 碳数分布均为 $C_{12}-C_{28}$, 以 $nC_{16:0}$ 相对丰度最高为特征, 具明显的偶碳数优势。两样均检测出较明显的直链二元酸系列, 碳数分布分别为 C_9-C_{22} 和 C_9-C_{25} , 但其相对丰度比干酪根脂肪酸中该系列要低得多。两样中均可检测出相对丰度较低的芳香酸系列, 有苯二甲酸、苯三甲酸和萘甲酸, 以苯二甲酸相对丰度最高为特征。其一元酸: 二元酸: 芳香酸值分别为 1.00: 0.13: 0.07 和 1.00: 0.19: 0.10 表明强干酪根脂肪酸中以直链一元酸占绝对优势为特征, 直链二元酸和芳香酸相对丰度均很低。强干酪根脂肪酸中均还检测出六元、七元和八元环状硫, 且相对丰度异常高, 它们可能对脂肪酸的赋存形式有影响。

2.2 酸解后

C-1 和 C-2 烃源岩经索氏三元抽提后的岩渣先经 10% 的 HCl 完全酸解后, 再按前述相同方法抽提干酪根脂肪酸和强干酪根脂肪酸。

2.2.1 干酪根脂肪酸

C-1 和 C-2 烃源岩渣经酸解后抽提出的干

酪根脂肪酸主要检测出直链一元酸、直链二元酸和芳香酸 3 个系列 (图 3)。一元酸的碳数分布均为 C_{13} — C_{28} , 以 $nC_{16:0}$ 相对丰度最高为特征, 呈明显偶碳数优势; 其 C_{20} 以上高碳数长链酸的相对丰度明显大于未酸解样干酪根脂肪酸中的高碳数长链酸。二元酸碳数分布均为 C_9 — C_{24} , 前峰群以 C_9 和后峰群以 C_{18} 二元酸相对丰度最高为特征。芳香酸仍然检测出苯二甲酸、苯三甲酸和萘甲酸。其一元酸 : 二元酸 : 芳香酸值分别为 $1.00 : 0.77 : 0.61$ 和 $1.00 : 0.77 : 0.27$, 表明经酸解后干酪根脂肪酸以直链一元酸相对丰度最高, 二元酸相对丰度显然比未酸解干酪根脂肪酸中二元酸的相对丰度降低, 芳香酸相对丰度升高。

2.2.2 强干酪根脂肪酸

图 4 给出的是 C-1 和 C-2 岩渣经酸解后强干酪根脂肪酸 (甲酯) 的 GC-MS 总离子流图。两样品均检测出直链一元脂肪酸、直链二元脂肪酸和芳香酸 3 个系列, 其相对丰度比分别为 $1.00 : 0.21 : 0.26$ 和 $1.00 : 0.20 : 0.11$; 与未酸解强干酪根脂肪酸比较, 酸解后强干酪根脂肪酸中二元酸和芳香酸的相对丰度增强。直链一元酸

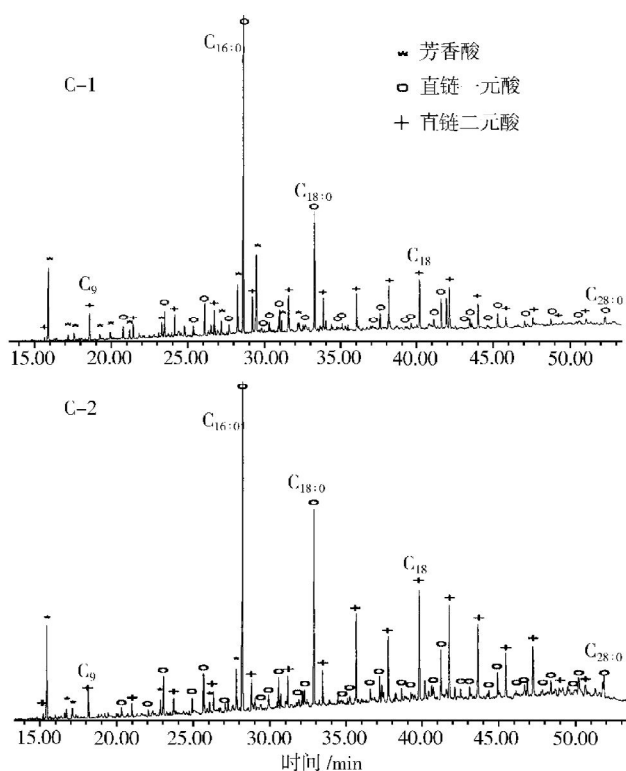


图 3 C-1 和 C-2 岩样酸解后干酪根脂肪酸 GC-MS 总离子流

Fig. 3 GC MSD TIC of kerogen fatty acid after acidolysis in C-1 and C-2 samples

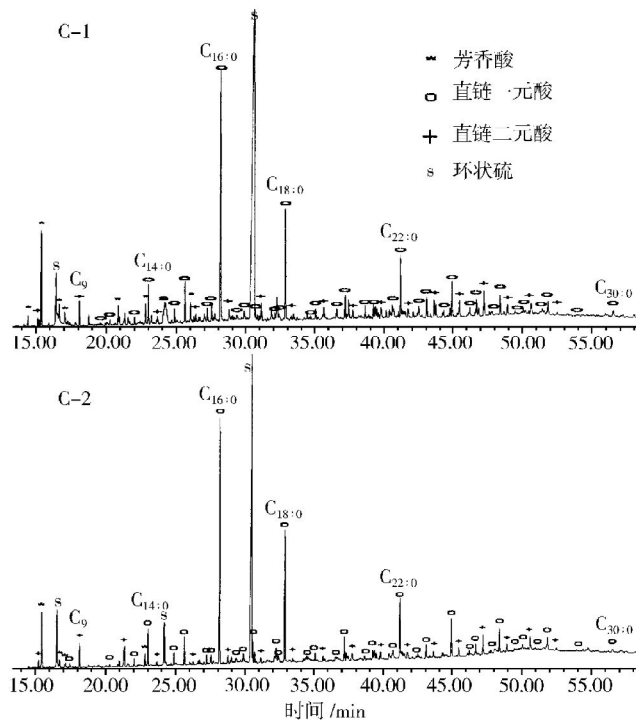


图 4 C-1 和 C-2 岩样酸解后强干酪根脂肪酸 GC-MS 总离子流

Fig. 4 GC MSD TIC of enhanced kerogen fatty acid after acidolysis in C-1 and C-2 samples

的碳数分布两样品均为 C_{12} — C_{30} , 比未酸解强干酪根脂肪酸稍宽, 仍以 $nC_{16:0}$ 相对丰度最高为特征, 偶碳数优势明显。二元酸碳数分布为 C_9 — C_{25} , 其分布特征与未酸解强干酪根脂肪酸相似。芳香酸检测出苯二甲酸与苯三甲酸, 前者的相对丰度大于后者。酸解后强干酪根的脂肪酸中检测出异常高的八硫环和明显的六硫环和七硫环。由于酸解前、后干酪根脂肪酸中均未检测出这类环状单质硫, 而在酸解前、后强干酪根脂肪酸中均检测出异常高的这类物质, 表明这些环状硫主要存在于干酪根结构中而不在其边缘, 且这些环状硫因其具强烈的吸电子效应对干酪根结构中富集脂肪酸作出了贡献。

3 脂肪酸赋存形式

表 2 是不同含量碳酸岩的烃源岩渣酸解前、后不同皂化条件下抽提的干酪根脂肪酸和强干酪根脂肪酸数据表。

从表中看出, 未经酸解处理烃源岩渣干酪根中脂肪酸抽提量 C-1 和 C-2 分别为 0.010 0% 和 0.020 4%, 碳酸盐含量低的样 (C-2) 抽出量是碳酸盐含量高的样 (C-1) 的 1 倍。未经酸解处理的烃源岩渣强干酪根脂肪酸抽提量 C-1 为

表 2 脂肪酸抽提量数据表

Table 2 Datasheet of extracted volume of fatty acid

	皂化条件	样 名	样号	碳酸盐含量 /%	样品量 /g	脂肪酸量 /g	样品中脂肪酸含量 /%
未酸解 岩渣	70℃, 5% NaOH - CH ₃ OH	干酪根脂肪酸	C- 1	59. 17	30. 184 1	0. 003 1	0. 010 0
			C- 2	17. 27	30. 335 5	0. 006 2	0. 020 4
	200℃, 8% NaOH - CH ₃ OH	强干酪根脂 肪酸	C- 1	59. 17	15. 507 3	0. 001 0	0. 006 4
			C- 2	19. 27	14. 503 6	0. 002 0	0. 013 7
酸解 岩渣	70℃, 5% NaOH - CH ₃ OH	干酪根脂肪酸	C- 1	59. 17	30. 000 3	0. 011 5	0. 038 3
			C- 2	17. 27	30. 003 1	0. 022 0	0. 073 3
	200℃, 8% NaOH - CH ₃ OH	强干酪根脂 肪酸	C- 1	59. 17	14. 575 6	0. 027 8	0. 190 7
			C- 2	17. 27	11. 646 9	0. 011 0	0. 094 4

0.006 4%而 C- 2 为 0.013 7%, 同样 C- 2 样是 C- 1 样的 1 倍强, 表明未经酸解钙质泥岩及泥灰岩干酪根脂肪酸含量与其泥岩含量成正相关, 即岩样中碳酸盐含量越高其干酪根脂肪酸含量越低。

经酸解后烃源岩渣干酪根脂肪酸抽提量 C- 1 为 0.038 3% 而 C- 2 为 0.073 3%, 是未经酸解 C- 1 和 C- 2 样干酪根脂肪酸抽提量的 3.8 倍和 3.6 倍。经酸解后烃源岩渣强干酪根脂肪酸抽提量 C- 1 为 0.190 7% 而 C- 2 为 0.094 4%, 分别是 C- 1 和 C- 2 未经酸解强干酪根抽提量的 29.8 倍和 6.9 倍, C- 2 样是 C- 1 样的 4.3 倍 (C- 2 样中碳酸盐含量是 C- 1 样的 3.4 倍), 表明钙质泥岩及泥灰岩干酪根脂肪酸主要富集在碳酸盐晶体中, 且含碳酸盐量越大干酪根脂肪酸量越高。强干酪根脂肪酸异常高的富集可能不仅与碳酸盐晶体含量有关, 而且与高丰度环状单质硫的富集有关。

由于干酪根脂肪酸和强干酪根脂肪酸同一个样均表现为经酸解后抽提量大大高于未经酸解抽提量, 因而研究样品的干酪根和强干酪根中脂肪酸可能以两种形式赋存。1) 以脂肪酸钙 (镁) 盐的形式存在。在陆生植物中普遍存在脂肪酸的钙 (镁) 盐^[12]。这类有机质进入地质体后在碱性或中性环境中可稳定存在, 而且在形成碳酸盐晶体的过程中由于脂肪酸盐与碳酸钙易形成“氢键”而被富集在碳酸盐晶体内。TG- DTA 热解实验表明, 碳酸钙晶体在 700℃ 以后才可被破坏, 硬脂酸钙的裂解温度在 400℃ 以上, 硬脂酸镁的裂解温度在 300℃ 以上, 硬脂酸的裂解温度在 230℃ 以上 (图 5)。上述裂解温度是在无催化剂条件下的纯物质裂解温度。在复杂的地质条件下, 或遇弱酸性条件和相关的催化剂, 它们的裂解活化能会大大降低。由于碳酸盐晶体的分解温度很高, 因

而包裹在其中的脂肪酸盐能很好地被保留下来, 一旦晶体被破坏, 这些脂肪酸盐会很快被裂解为小分子烃类——气态烃, 而较难以长链液态烃形式存在。2) 以脂肪酸的形式存在。脂肪酸以脂、醚键形式结合在碳酸盐晶格内及晶格间隙中, 在碳酸盐晶体未被破坏时稳定存在, 很难用经典皂化法抽提出来。一旦碳酸盐晶体被破坏, 这些脂肪酸很快被裂解为小分子烃——气态烃。

柴达木盆地低演化泥灰岩和钙质泥岩的沥青“ A ”和干酪根脂肪酸中检测出相对丰度甚高的环状硫 (八硫环、七硫环), 样品在索氏抽提中曾加入铜条作脱硫处理, 表明这些环状硫以稳定态存在于沉积物及其抽提物中。

由于每个硫原子最外层有一对孤对电子, 因此以共价键相连接的环状硫形成类似苯环的大 π 键稳定电子云, 使这类环状硫不仅能在地质体和抽提物中稳定存在, 甚至在 450℃ 热模拟样中 (另文) 也同样稳定存在。硫的强吸电子性 (电负性) 可能会对脂肪酸及其盐的羟基基团的 δ^- 电子云具强烈的作用而使这类化合物存在于沉积有机质中的稳定性增加。

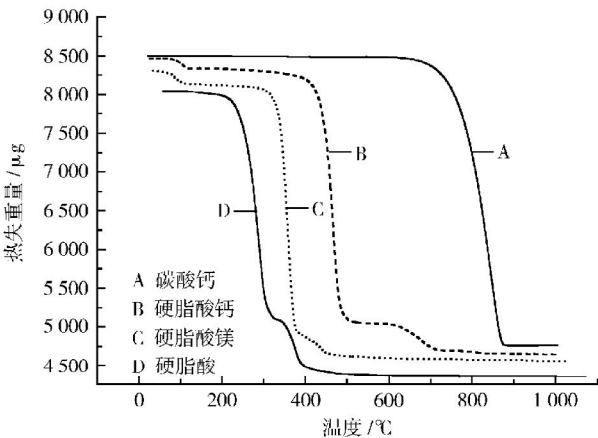


图 5 TG- DTA 热解分析图

Fig. 5 Analyticalmap ofTG- DTA pyrolysis

4 结论

1) 低熟钙质泥岩 (C-2) 和泥灰岩 (C-1) 经三元抽提后岩渣未经酸解抽提出的干酪根脂肪酸和强干酪根脂肪酸量与烃源岩中的泥岩含量成正比, 与其碳酸盐含量成负相关。强干酪根脂肪酸量只有干酪根脂肪酸的 30%。干酪根脂肪酸和强干酪根脂肪酸中均检测出直链一元酸、直链二酸和芳香酸 3 个系列。一元酸中以 $nC_{16:0}$ 相对丰度最高, 呈明显偶碳数优势; 二元酸中以 C_9 和 C_{18} 相对丰度最高; 芳香酸中以苯二甲酸相对丰度最高。干酪根脂肪酸中二元酸相对丰度明显高于强干酪根脂肪酸。

2) 低熟钙质泥岩 (C-2) 和泥灰岩 (C-1) 经三元抽提后岩渣经酸解后抽提出的干酪根脂肪酸和强干酪根脂肪酸的量是未经酸解抽提出的干酪根和强干酪根脂肪酸量和 3.6 及 3.8 倍和 6.9 及 29.8 倍, 表明泥灰岩和钙质泥岩中的脂肪酸钙 (镁) 盐和脂肪酸主要赋存在碳酸盐晶体中。

3) 脂肪酸钙 (镁) 盐以“氢键”形式被富集在碳酸盐晶体内, 而脂肪酸以脂、醚键形式赋存在碳酸盐晶体内而稳定存在。当烃源岩遇高温或其他物理化学条件使碳酸盐晶体遭破坏后, 这些脂肪酸盐和脂肪酸被释放出, 并很快发生裂解。脂肪酸盐和脂肪酸的裂解温度大大低于碳酸盐晶体的分解温度, 因而易形成小分子烃类——气态烃。干酪根中高丰度环状单质硫的存在, 可能为脂肪酸盐和脂肪酸的稳定存在作出了贡献。

4) 柴达木盆地第三系沉积有机质中硫以五元、六元和八元环稳定态存在, 其强烈的电负性可能对脂肪酸 (盐) 的稳定存在和富集起作用。

参 考 文 献

- 史继杨, 向明菊. 未熟低熟烃源岩中脂肪酸赋存形式与分布特征 [J]. 科学通报, 2000, 45(16): 1771~1776
Shi Jiyang Xiang Mingju The distribution and existing forms of fatty acids in immature source rocks [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(16): 1771~1776
- 向明菊, 史继杨, 周友平, 等. 不同类型沉积物中脂肪酸的分布、演化和生烃意义 [J]. 沉积学报, 1997, 15(2): 84~88
Xiang Mingju Shi Jiyang Zhou Youping et al The distribution and evolution of fatty acids in various sediments and its significance [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(2): 84~88
- Mudge SM, East JA, Bebianno M J et al Fatty acids in the Ria Formosa Lagoon, Portugal [J]. Organic Geochemistry, 1998, 29(4): 963~977
- 黄第藩. 中国未熟—低熟石油成因机制和成藏条件 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003
Huang Difan Origin mechanism and formation condition of immature oil in China [M]. Beijing Petroleum Industry Press, 2003
- 林九浩, 文志刚, 罗柳忻, 樊参. 1 井白垩、第三系脂肪酸初步研究 [J]. 石油与天然气地质, 1987, 8(3): 307~314
Lin Jiuhaq Wen Zhigang Luo Lixin Preliminary approach of Cretaceous to Tertiary fatty acids in well Fancan-1 [J]. Oil & Gas Geology, 1987, 8(3): 307~314
- 周世新, 夏燕青, 罗斌杰, 等. 脂肪酸盐生烃热模拟研究及其意义 [J]. 沉积学报, 1997, 15(2): 118~121
Zhou Shixin Xia Yanqing Luo Binjie et al Study on laboratory simulation of the hydrocarbon formation from salts of fatty acids [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(2): 118~121
- 张松林, 崔明中, 李振西, 等. 盐湖相低熟油脂脂肪酸的组成与分布特征 [J]. 沉积学报, 1999, 17(1): 130~155
Zhang Songlin Cui Mingzhong Li Zhenxi et al Composition and distribution features of fatty acids in salt-lake immature oil [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(1): 130~155
- 王锐良, 傅家谋, 盛国英, 等. 盐湖沉积物中微生物输入的脂肪酸生物标志化合物 [J]. 中国科学, 1989, 19(6): 635~644
Wang Ruiliang Fu Jiamou Sheng Guoying et al Fatty acid biomarkers microorganisms in salt-lake sediment [J]. Science in China, 1989, 19(6): 635~644
- 段毅, 周世新, 孟自芳. 塔里木盆地群 5 井和曲 1 井原油的源研究 [J]. 石油实验地质, 2001, 23(4): 433~456
Duan Yi Zhou Shixin Meng Zifang Study on the oil source of crude oils from well Qun-5 and well Qu-1 in the Tarim basin—new evidence from fatty acids [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2001, 23(4): 433~456
- Jaffe R, Gallardo M T. Application of carboxylic acid biomarkers as indicators of biodegradation and migration of crude oils from the Maracaibo basin, Western Venezuela [J]. Organic Geochemistry, 1993, 20(7): 973~984
- Cooper J E. Fatty acid in recent and ancient sediments and petroleum reservoir water [J]. Nature, 1962, 193: 744~746
- 左天觉. 烟草的生产、生理和生物化学 [M]. 上海: 上海远东出版社, 1993: 379~384
Zuo Tianjie Production, physiology and biochemistry of tobacco [M]. Shanghai Shanghai Far East Press, 1993: 379~384

(编辑 李 军)